SATELITES IRREGULARES • PSEUDOGENES



INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA MENTE DEL EXPERTO

TERMODINAMICA DE LA LOCOMOCION ANIMAL

LOS PECES Y EL BOSQUE



EL CLIMA Y LA EVOLUCION DE LAS MONTAÑAS

LECTINAS



OCTUBRE 2006
6,00 EUROS



INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Octubre de 2006

Número 361



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Brian Napack

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Angel Garcimartín: *Termodinámica de la locomoción animal*; M.ª Rosa Zapatero: *Satélites irregulares*; Felipe Cortés: *Pseudogenes*; Luis Bou: *La mente del experto*, *Adiós a las palabras clave*; Sònia Ambròs: *El clima y la evolución de las montañas*; Joandomènec Ros: *Los peces y el bosque*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes*, *Ideas aplicadas* y *Curiosidades de la física*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



...cincuenta años

RADIACIÓN NO APROVECHADA. «Por ahora, la energía nuclear ofrece la alternativa más esperanzadora a los combustibles fósiles. Sin embargo, los avances en ese campo hasta la fecha apenas han rozado el fondo de la cuestión. Hablamos de "energía" nuclear, pero en realidad estamos tratando con calor nuclear. Nos proponemos acoplar el reactor nuclear a la turbina de vapor, un invento del siglo XIX de modesta eficiencia, y desperdiciar las tres cuartas partes de la energía que genera la reacción nuclear. Parece un despilfarro desaprovechar así un combustible nuclear precioso. Obviamente, el paso siguiente en la generación de energía debe pasar por la eliminación del ciclo del vapor y la conversión directa de la radiación en energía.»

MÁQUINA COMEDORA. «La llamo planta viviente artificial. Igual que el vegetal, la máquina extraería sus propias materias primas del aire, el agua y el suelo. Obtendría energía de la luz solar, probablemente mediante una batería solar o un motor de vapor. Emplearía esa energía para refinar y purificar los materiales y fabricar piezas con ellos. Luego, como la máquina autorreproductora de John Von Neumann, ensamblaría las piezas para obtener un duplicado de sí misma. Y se recolectaría después para conseguir una sustancia que extrajera o sintetizara.»

—Edward F. Moore

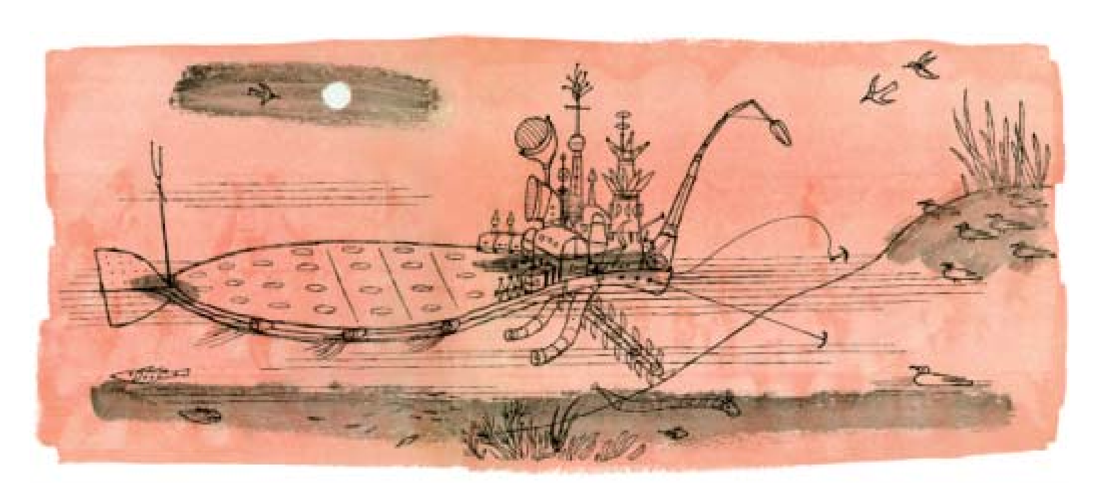
...cien años

EL "DREADNOUGHT" A TODA MÁQUINA. «El acorazado británico 'Dreadnought', que ha superado las pruebas de mar, navegó durante ocho horas a una media de 21,5 nudos. Creemos que nuestros constructores navales deben apartarse de la un tanto conservadora política que han seguido y destinar una mayor fracción del desplazamiento de nuestros futuros acorazados a la potencia motriz. Es cierto que el 'Dreadnought' es, de todos los barcos de guerra extranjeros, el menos probable que se alinee frente a nosotros; pero debemos recordar que, dado que la marca establecida por ese navío constituirá una referencia para todos los gobiernos extranjeros, habrá que buscar las velocidades de 20 nudos y más para los acorazados del futuro.»

ANTES DE LA TECTÓNICA DE PLACAS. «El profesor Fusakichi Omori, famoso sismólogo japonés que ha estudiado los terremotos de California, ha llegado a la conclusión de que ese estado quedará libre de perturbaciones sísmicas durante medio siglo y, con toda probabilidad, durante mucho tiempo más. Afirma que el deslizamiento de la corteza terrestre se debía a que, en su punto más débil, ésta se encontraba en equilibrio inestable, como resultado de la redistribución de materiales. Se tarda mucho tiempo en llegar a semejante situación; deberán cambiar de posición toneladas de materiales y vastas cantidades de tierra tendrán que ser arrastradas por los ríos hacia el mar, antes de que la redistribución de materiales sea tan notable como para provocar un terremoto.»

...ciento cincuenta años

SED DE ENERGÍA. «La mayoría de nuestras ciudades y pueblos manufactureros deben su auge a la fuerza del agua. Se construyeron al borde de ríos con saltos de agua para mover máquinas. Pero ahora es materia de preocupación de un gran número de industriales que su abastecimiento de agua sea más impredecible cada año, conforme se aclaran los bosques. De numerosos cursos de agua que antaño portaban fuerza para las norias sólo queda el canal vacío. Con todo, merced al vapor, no han decrecido los fabricantes en nuestro país. Con unas abundantes reservas de combustible, el vapor constituye una fuente fiable de energía para mover máquinas; es posible levantar una fábrica de vapor lejos de lugares naturales excepcionales, como cascadas. Las fábricas de vapor pueden erigirse dentro o cerca de ciudades y emporios comerciales.»



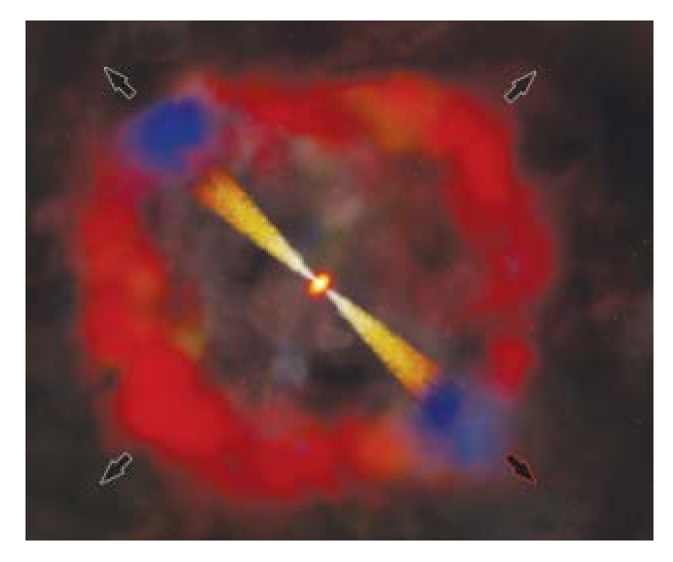
Máquina autorreplicante, un artefacto fantasioso que se alimenta de minerales y plantas, 1956

COSMOLOGIA

Camino de la confusión

Los astrónomos saben que, si apuntan sus telescopios a los cuásares divisarán una media de una galaxia “en primer plano” por cada cuatro que aparezcan en el fondo de la imagen. Dada la uniformidad que caracteriza al universo, el número de galaxias que aparecieran en primer plano debería ser también el mismo para un grupo de erupciones de rayos gamma. No hay tal. Jason X. Prochaska, de la Universidad de California en Santa Cruz, acaba de publicar el resultado de sus observaciones: cuenta una media de cuatro galaxias en primer plano por cada 15 erupciones. Si ese dato se consolida, querrá decir que se ha venido interpretando erróneamente un aspecto clave del gas en primer plano. Lo que, a su vez, podría entrañar un grave problema cosmológico. En efecto, los astrofísicos se apoyan en el gas para inferir la composición de las galaxias primitivas y la distribución de la materia oscura, que abarca hasta el 90 por ciento de la materia del universo. Pudiera suceder que las galaxias de primer plano se hallaran rodeadas de tanto polvo, que oscurecieran algunos cuásares; asimismo, podrían estar enfocando la luz procedente de las erupciones de rayos gamma, impidiendo que los astrónomos vean los más débiles. O quizá las supuestas galaxias no sean sino gas procedente de la erupción misma, según conjeturan los investigadores.

—J. R. Minkel



Un misterio cósmico envuelve a los recuentos de galaxias ante cuásares y estallidos de rayos gamma, como este GRB020813, en el que el gas procedente de una supernova convertida en un agujero negro crea dos chorros de partículas (*se trata de una elaboración, no de una imagen real*).

TRANSGENICOS

Pan para hoy, hambre para mañana

El algodón genéticamente modificado que produce un pesticida a partir del microorganismo *Bacillus thuringiensis* no asegura el beneficio económico a largo plazo. Un equipo de la Universidad de Cornell entrevistó a 481 agricultores chinos de cinco provincias punteras en el cultivo de algodón. Los que cosechan la variedad Bt obtuvieron durante años unas ganancias superiores en un tercio a las de los cultivadores tradicionales, gracias al dinero que se ahorraban al rebajar el uso de pesticidas hasta un 70 por ciento. Pero luego empezaron a proliferar insectos, como los míridos, resistentes al Bt. Las nuevas plagas les obligaron a rociar los campos a la manera tradicional. Con ello se acabaron las ganancias, pues las semillas Bt cuestan el triple que las corrientes. Para los investigadores la solución consistiría en atacar las plagas secundarias con depredadores naturales o modificar el algodón para redoblar su resistencia.

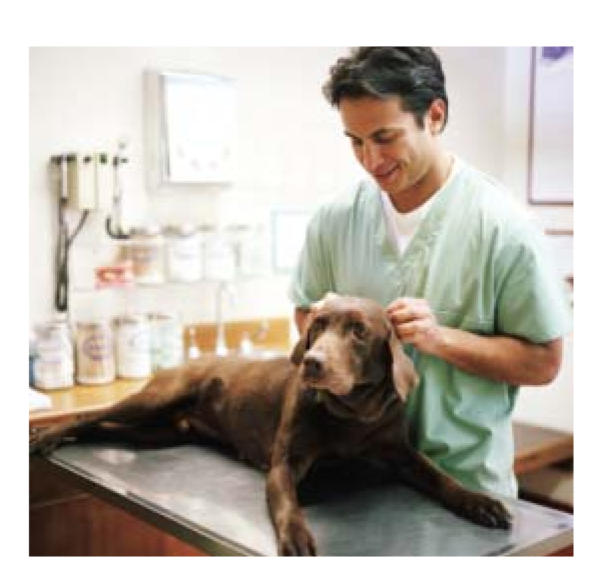
—Charles Q. Choi

CANCER

Tumores caninos transmisibles

Los perros, y quizás el lobo gris y los coyotes, padecen tumores malignos de transmisión venérea. El análisis del ADN de muestras de tejido de perros de los cinco continentes ha descubierto que las células tumorales no pertenecen a los perros donde se asientan, sino que llegan a ellos como parásitos. Las muestras celulares resultaron casi idénticas genéticamente entre sí y parecidas a células de lobos y de razas de perros chinas o siberianas afines. A juzgar por el número de mutaciones acumuladas en las células, se originaron hace entre 200 y 2500 años, lo que las convierte en la cepa cancerosa más antigua que se conoce. Este cáncer podría dar indicios de cómo sobreviven los tumores y se libran del sistema inmunitario.

—Charles Q. Choi



Los tumores venéreos caninos constituyen la cepa de células cancerosas de mamífero más antigua que se conoce.

M. WEISS/NASA/CXC (*arriba*); TAXI/Getty Images (*abajo*)

SALUD

Lastre fetal

Se ha conjeturado que una mala salud del feto en el útero presagia enfermedades crónicas de adulto. Estudios de los efectos de hambrunas breves respaldan la hipótesis. El economista Douglas Almond ha encontrado también secuelas socioeconómicas. Ha estudiado a quienes estuvieron expuestos prenatalmente a la gripe de 1918. Los censos de los años sesenta, setenta y ochenta muestran que los miembros de ese grupo terminaron la enseñanza secundaria con una frecuencia en un quince por ciento menor; que sus salarios, en el caso de los hombres, fueron entre un cinco y un nueve por ciento menores (a causa de invalidez) y que sufrieron pobreza con una probabilidad un quince por ciento mayor.

—J. R. Minkel



La mala salud fetal tiene consecuencias en la edad adulta.

ARMAS

Física futurista

Armas antimateria. Teleportación. Microondas de "voces extranaturales" que penetran en las mentes de enemigos desprevenidos. Granadas de mano nucleares. Para la mayoría de los científicos, esas ideas, por fantasiosas y futuristas, no merecen atención. Para ellos, pero en la administración estadounidense han arraigado proyectos "marginales" de parejo tenor. Así, la "bomba de hafnio". Conocida también por bomba isomérica, llevaría, según sus partidarios, cargas de kilotones en diminutas carcasas. Con el mismo principio, prosiguen, podrían fabricarse láseres de gran potencia. Bastaría con lograr que un elemento con algunos protones excitados, un "isómero nuclear", liberara por desintegración su energía adicional y provocase la fusión de otros átomos. La idea no fue tomada en serio hasta que uno de sus defensores más empedernidos afirmó haber "desencadenado", con un aparato odontológico de rayos X, la liberación de energía de isómeros del hafnio. Pero no pudo repetirse ni siquiera con láseres mucho más potentes. Los críticos objetaban que el hafnio, en todo caso, serviría sólo para una bomba radiológica, o "sucia". Eso no ha impedido que el Pentágono se haya gastado, sólo en la bomba de hafnio, al menos diez millones de dólares. El autoengaño, la creencia en amenazas imaginarias, la enormidad del presupuesto militar, donde se pierde de vista cualquier partida pequeña, favores a algún grupo de votantes por parte de los congresistas, la ignorancia de los altos cargos y el secretismo son algunas de las razones que se han dado de que el Pentágono esté costeando investigaciones quiméricas. Steven Aftergood, director del Proyecto Secretos Oficiales de la Federación Americana de Científicos, señala que en 2004 se empezó a estudiar la teleportación para su eventual uso por las fuerzas aéreas de EE.UU. Aftergood lo llama "transporte a lo Star-Trek". La extraña investigación no pasó por apuro alguno mientras se ignoró su existencia.

—Daniel G. Dupont, director de InsideDefense.com e InsideGreenBusiness.com



Filfa nuclear. Según la dudosa teoría de las bombas "isoméricas", las granadas de mano podrían algún día tener una potencia de un kilotón.

NEIL BROMHALL *Photo Researchers, Inc (arriba)*; AHMAD AL-RUBAYE *AFP/Getty Images (abajo)*

CIENCIA PUBLICADA

Los errores se propagan

Recientes acontecimientos han llevado a las revistas científicas a tomar medidas para evitar la adulteración de los datos en que se basan los artículos que publican. Un químico, Thomas J. Katz, de la Universidad de Columbia, en Nueva York, recuerda en una carta remitida a *Science* otra fuente de diseminación de falsedades en la ciencia. La bibliografía primaria es inabarcable; de ahí que los científicos recurran a los *reviews*, artículos que condensan el estado de la cuestión en un tema determinado. Pero Katz ofrece el ejemplo de una revista dedicada a la enseñanza de la química, donde se presenta como un avance fundamental un experimento que no consta en publicación alguna. Esta información defectuosa se ha tomado, al parecer, de un *review,* que a su vez bebe de otros siete, todos equivocados, aunque cite al respecto una fuente primaria; lástima que en ella no figure por ninguna parte el tal experimento. La ciencia, dice Katz, no siempre se corrige a sí misma; a veces hay que corregirla, pero las revistas no ayudan, porque se resisten a reconocer los errores. Esperamos que no sea nuestro caso; así, en los apuntes del mes pasado los duendes de imprenta introdujeron una "Real Academia de Ciencias de Estados Unidos", sin permiso de su constitución republicana. Por suerte, creemos que esta denominación no llegará muy lejos.

Termodinámica de la locomoción animal

Pese a parecer movimientos distintos, la carrera, el vuelo y la natación podrían compartir principios físicos

Adrian Bejan y James H. Marden

Stephen Jay Gould afirmaba que, si el reloj de la evolución diera marcha atrás y comenzara de nuevo su andadura hasta el presente, los animales que nos encontraríamos en la Tierra serían distintos de los que conocemos hoy día. El azar, proponía el paleontólogo, ha influido de forma notable en la determinación de los organismos que han sobrevivido y evolucionado en el curso de la historia del planeta. Pero aunque ello fuera cierto, quizás existan algunos límites, algunas reglas generales de diseño que rijan para toda forma animal. Bajo la teoría de la selección natural subyace la hipótesis de que algunos diseños son mejores que otros. Pero, ¿qué les hace ser mejores? ¿Hay reglas generales que lo determinen?

La biología podría tomar prestadas de la ingeniería algunas ideas sobre la cuestión. En concreto, de la termodinámica. Uno de los objetivos básicos de cualquier diseño, de un animal, de un edificio o de una máquina, consiste en obtener las máximas prestaciones con la mínima inversión energética. Tamaña optimización del diseño se observa, por ejemplo, en las formas arborescentes de las cuencas fluviales, la estructura de los bronquios o los motivos geométricos de las fracturas que crea el barro al secarse; en la forma tubular de las cañerías, o en la proporcionalidad entre la profundidad y la altura que se da en la sección transversal de los ríos. Todas estas configuraciones logran el máximo caudal de materia con la mínima pérdida por resistencia.

Por tanto, la mejora progresiva del acceso al flujo constituye un mecanismo de configuración de los sistemas naturales de flujos, animados e inanimados. A partir de esta idea, uno de los autores (Bejan) ha desarrollado la *teoría construccional*. De acuerdo con ella, para que un sistema de tamaño finito persista en el tiempo, debe evolucionar en el sentido de proporcionar un acceso cada vez más expedito a las corrientes que fluyen a través del mismo.

Un flujo corresponde a un equilibrio de áreas con resistencias grandes y pequeñas. Se logra mediante una distribución óptima de las imperfecciones, de forma que el mayor número posible de puntos del área se someta a un esfuerzo tan igualado como se pueda. Para obtener ese equilibrio óptimo de las resistencias, el material debe adoptar ciertas distribuciones. Así, la cuenca de un río se configura y reconfigura de modo que el agua

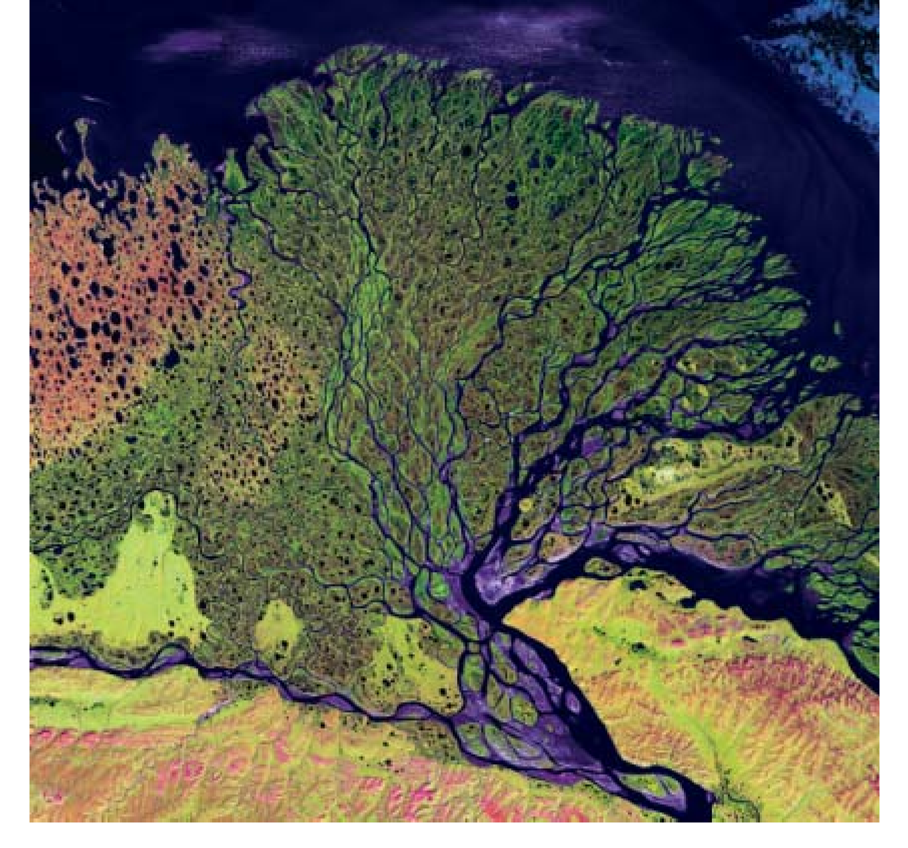
1. VUELO, CARRERA Y NATACION son las tres formas de locomoción que la naturaleza ha resuelto en el curso de la evolución. Si la evolución comenzara de nuevo desde el principio, nada nos asegura que esas especies reaparecieran, fruto de la selección natural. Pero sí cabe la posibilidad de que hubiera reglas generales de diseño que siguieran rigiendo el desarrollo animal, en la hipótesis de que todos los mecanismos de locomoción reiniciaran su evolución. Desde el punto de vista termodinámico, la locomoción corresponde a un flujo de masa de un lugar a otro. Lo mismo que otros sistemas de flujo, el movimiento se optimiza de suerte tal, que la masa del animal se mueve a la mayor distancia posible con el mínimo gasto energético. De estas pautas básicas derivan fórmulas que describen los diversos tipos de movimiento.

JAMES ZIPP, *Photo Researchers, Inc.* (*arriba*); PATRICK WARD/ALAMY (*centro*); PETE ATKINSON/NHPA (*abajo*);/*American Scientist*

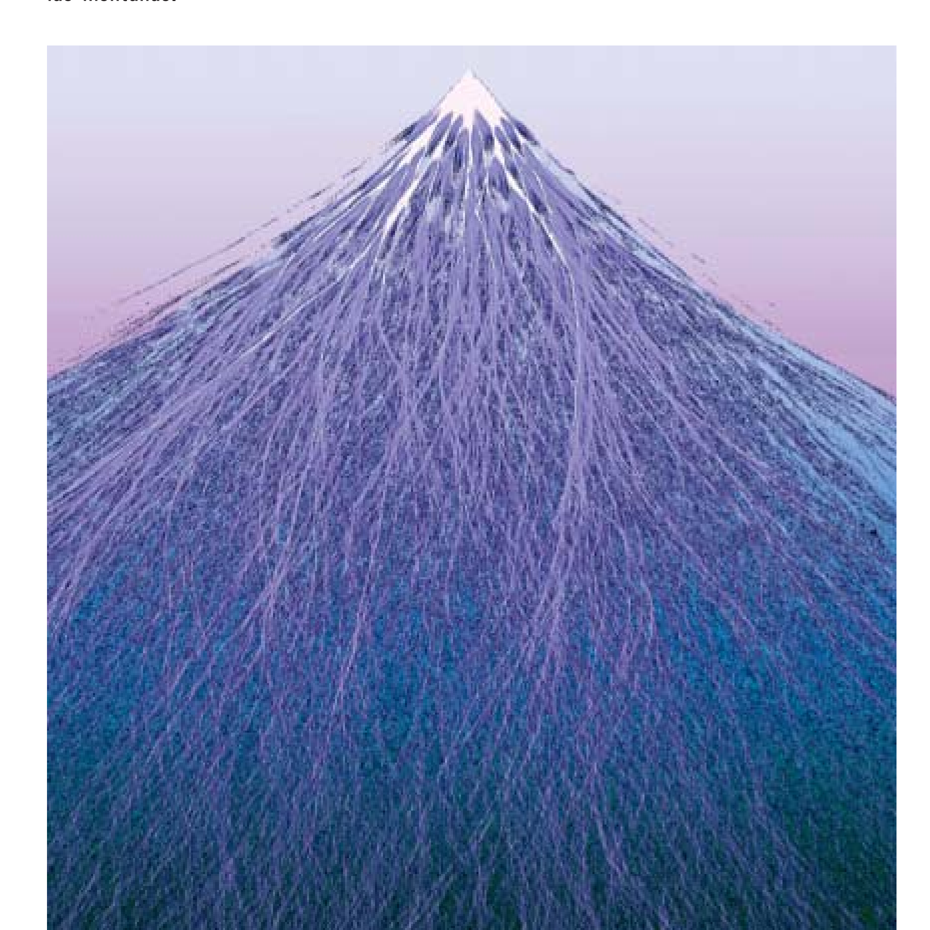


acabe por descargarse con la mínima resistencia por la desembocadura. La forma arborescente de un río antiguo constituye la configuración que proporciona el acceso más expedito desde un número infinito de puntos (la cuenca de drenaje) hasta otro punto (la desembocadura).

La optimización corresponde a una idea que viene de lejos y a un fenómeno natural todavía más antiguo. Nuestra contribución consistió en refinar su estudio hasta reducirla a un principio. Podría haberse conseguido medio siglo atrás. Sin embargo, la física moderna se atuvo a la norma de que todas las cosas se construyen a partir de la suma de efectos locales infinitesimales, como ocurre en la física de partículas. La teoría construccional supone un salto en la dirección opuesta: una forma de racionalizar características, objetivos y comportamientos macroscópicos.



2. SEGUN LA TEORIA CONSTRUCCIONAL, para que un sistema de tamaño finito subsista en el tiempo, debe evolucionar y, por ende, facilitar, de forma progresiva, el paso de las corrientes que fluyen a través de él. Existe una optimización de este tipo que se observa en numerosos sistemas: la forma arborescente. Constituye a menudo la configuración que proporciona un acceso más expedito entre un número infinito de puntos y una fuente. Una imagen en falso color tomada desde un satélite muestra el delta del río Lena, en Rusia (*arriba*), que adopta una forma de abanico similar a la de ciertos tipos de coral. Una simulación informática del flujo de los electrones a través de un paisaje bidimensional de potencial eléctrico variable (*abajo*) recuerda el rastro que deja la nieve al fundirse, siguiendo las trayectorias de mínima resistencia por la falda de las montañas.



CORTESIA DE NASA *Landsat Project Science Office y USGS National Center for EROS* (*arriba*); ERIC HELLER/*Photo Researchers, Inc.* (*abajo*)/*American Scientist*

El flujo de los animales

Si bien puede parecer una idea ingenua, la teoría construccional se extiende más allá del dominio de la física. En el ámbito de la biología, la locomoción vendría a ser un flujo de masa de un lugar a otro. Los animales se mueven por la superficie de la Tierra lo mismo que los ríos, los vientos y las corrientes oceánicas. Buscan y encuentran trayectorias y ritmos que les permiten desplazar su masa a la mayor distancia posible, dado un cierto gasto energético, a la vez que minimizan el rozamiento y otras imperfecciones termodinámicas.

Los animales recurren a formas de locomoción diversas según el propósito, pero el uso eficiente de la energía resulta capital a lo largo de toda su vida. El diseño básico de la mayoría de los animales debería evolucionar hacia sistemas de locomoción que optimizaran la relación entre distancia y gasto energético.

Se han acometido numerosos estudios sobre locomoción. En su mayoría, se desarrollaron a partir de datos empíricos; los modelos se reelaboran hasta encontrar el que cuadra con los resultados de las observaciones experimentales. Muy otro es el enfoque de la teoría construccional; parte de teorías basadas en conceptos físicos para deducir y predecir estructuras y funciones. No sólo determina la velocidad de alcance máximo, sino

que, además, pronostica la frecuencia de paso o de batido y la generación neta de fuerza.

Esta teoría no pretende dar cuenta de todo el abanico de formas biológicas. No sostiene que los animales deban comportarse o adquirir cierta complexión de manera predecible, sino sólo que en una amplia gama de tamaños y especies deberían aflorar tendencias centrales. Con frecuencia los factores ecológicos favorecerán formas de locomoción distintas de las que optimizan la distancia recorrida por gasto energético; ello ocurre, por ejemplo, cuando abunda la energía y es alto el riesgo de ser capturado por un predador ágil. También la historia evolutiva y la naturaleza errática de las mutaciones determinan la diversidad de rasgos sobre los que opera la selección. Estos y otros factores tienen como primera consecuencia el incremento de la variación en torno a las tendencias centrales predichas.

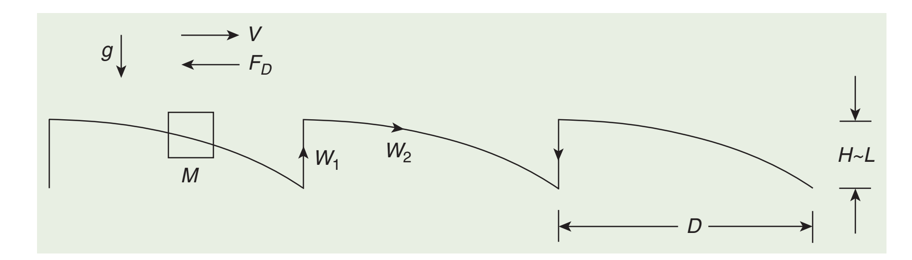
Se creía que existían diferencias intrínsecas entre los principales tipos de locomoción: carrera, vuelo y natación. Los animales que corren y los que vuelan sienten su peso, mientras que los que nadan experimentan una flotabilidad neutra. Las alas de las aves presentan diferencias estructurales con las patas de los tetrápodos y las aletas de los peces. Las alas batientes divergen de las patas que trotan y del cuerpo cimbreante de un pez. Aves y peces, en su marcha habitual, se mantienen a una altura y profundidad constantes, mientras que al correr los animales saltan sin cesar, describiendo una trayectoria cicloidal. Dar un paso mediante la propulsión contra el suelo no se parece en nada a sentir el roce del aire o del agua. Para complicar las cosas, existe una amplia gradación de tamaños corporales, formas y velocidades, incluso dentro de la misma forma de locomoción (entre las aves voladoras y los insectos, por ejemplo).

A pesar de todas estas diferencias, se han encontrado convergencias notables en ciertas características funcionales de animales corredores, voladores y nadadores. La frecuencia del trote de los vertebrados mantiene aproximadamente la misma relación con la masa corporal (M) que la frecuencia natatoria de los peces: a saber, $M^{-0,17}$. La velocidad de carrera de los animales corredores mantiene aproximadamente la misma relación con la masa corporal que la velocidad del vuelo de las aves: $M^{0,17}$. La fuerza generada por los músculos de los animales al correr, volar o nadar se ajusta, con escasas variaciones, a unos 60 newton por kilogramo. Se dan otras correlaciones: por ejemplo, entre el tamaño corporal y la frecuencia respiratoria.

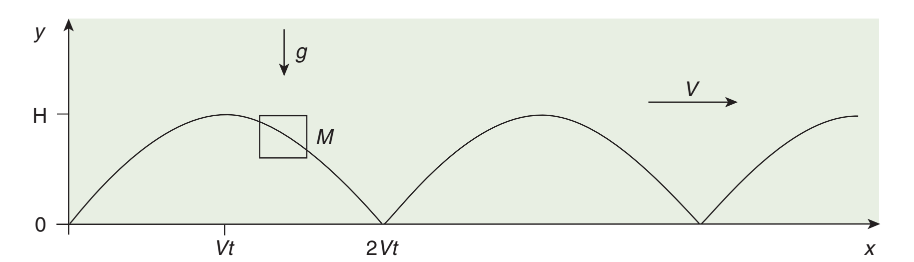
Al intentar explicar estas peculiaridades del diseño animal, los biólogos se han centrado en factores restrictivos comunes (la velocidad de la contracción muscular, los límites mecánicos de las estructuras, etcétera). La teoría construccional, en cambio, adopta otro enfoque: no parte de restricciones, sino que define unos objetivos generales de diseño de los que se deducen principios que los sistemas de locomoción optimizados deben cumplir. Al poner de manifiesto los parámetros físicos subyacentes comunes, la teoría construccional unifica todas las formas de locomoción aludidas. Esta teoría no se excluye mutuamente con otras hipótesis, como ocurre con la de las restricciones comunes; antes bien, proporciona normas para el diseño y explica la naturaleza de tales restricciones. Predice, explica y organiza todo un cuerpo de conocimientos empíricos mediante la reunión, en una teoría, de las velocidades de crucero, las frecuencias y la generación de fuerza en la carrera, el vuelo y la natación.

El vuelo

En el vuelo, el pájaro debe afrontar dos gastos energéticos. Por un lado, la pérdida vertical: el cuerpo pesa, por ello cae y el ave debe realizar un trabajo para sustentarse y mantenerse a una cierta altitud de crucero. Por otro, la pérdida horizontal: el ave realiza un trabajo para avanzar venciendo la resistencia del aire. Ambos trabajos se necesitan para volar; ninguno puede sortearse del todo. Sin embargo, pueden equilibrarse

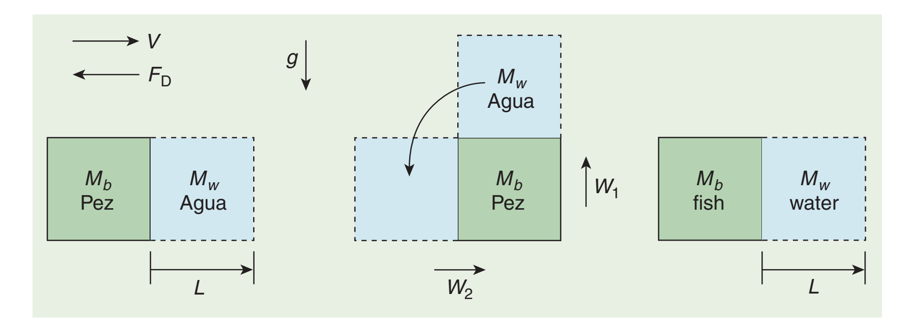


3. ESQUEMA DE LA TRAYECTORIA PERIODICA de un animal volador. Muestra los factores que la teoría construccional considera para describir la locomoción animal. Aparece un patrón en dientes de sierra porque la velocidad de vuelo (V) resulta de dos trabajos que se realizan de forma alternativa: uno para vencer la pérdida vertical (W_1) y otro para vencer la pérdida horizontal (W_2). W_1 se calcula multiplicando la masa del ave (M) por la gravedad (g) y por la altura que pierde en cada ciclo (H), siendo esta última proporcional a la longitud del cuerpo (L). W_2 corresponde al producto de la fuerza de rozamiento con el aire (F_D) por la distancia recorrida en cada ciclo (D).



4. TRAYECTORIA PERIODICA DE UN ANIMAL A LA CARRERA. La distancia de cada zancada es un múltiplo del producto de la velocidad del animal (V) por el tiempo (t) de caída libre desde la altura de la zancada (H). En consecuencia, t equivale al cociente entre H y la gravedad (g), elevado a 1/2. La longitud de la zancada y H son proporcionales a la longitud del cuerpo; la masa (M) se aproxima a la densidad corporal multiplicada por la longitud corporal al cubo.

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*



5. PARA AVANZAR EN DIRECCION HORIZONTAL, un pez debe desalojar el agua de su camino. Sólo puede hacerlo hacia arriba. A fin de avanzar una distancia igual a su longitud corporal (L) a determinada velocidad (V), un pez con masa M_b debe desalojar una masa de agua equivalente (M_a). Imaginemos que esta masa de agua regresa luego hacia abajo para rellenar el espacio que deja el pez tras de sí. El trabajo requerido para desplazar hacia arriba la masa de agua (W_1) se aproxima al producto de M_b por L y por la gravedad (g). Durante el mismo intervalo, el pez debe realizar un trabajo para progresar horizontalmente (W_2), proporcional a la resistencia del agua (F_D) y a la distancia recorrida en cada ciclo, que en este caso es la longitud corporal (L).

entre sí de forma que la suma sea mínima. Esta distribución óptima de la inversión energética determina el propio vuelo.

El vuelo no consiste en un movimiento estacionario a una altitud constante. La trayectoria define una línea horizontal quebrada, con un tamaño de los dientes de sierra dictado por el batido de las alas. Corresponde a un ritmo optimizado en el que el trabajo realizado para recobrar altura se armoniza con el trabajo necesario para hacer avanzar el cuerpo en dirección horizontal. Dos tendencias opuestas configuran este equilibrio: conforme aumenta la velocidad de vuelo, decrece la pérdida vertical y aumenta la horizontal. El equilibrio se alcanza batiendo las alas de modo que la velocidad de vuelo sea la adecuada. A partir de estos parámetros, la teoría construccional predice que las velocidades de vuelo deberían distribuirse de forma proporcional a la masa del pájaro elevada a la potencia 0,17. Las frecuencias de batido de las alas deberían ser proporcionales a la masa elevada a –0,17. Estas predicciones concuerdan con las observaciones realizadas en toda la gama de cuerpos voladores.

Esta expresión se deduce de forma algebraica mediante un proceso que conlleva numerosas sustituciones de términos por fórmulas equivalentes. Para simplificar, se eliminan todas las constantes dentro del orden de magnitud de la unidad (entre 0,1 y 10).

Veamos cómo llegamos a esa expresión para la velocidad. En primer lugar, consideramos que la teoría construccional requiere la minimización de las pérdidas energéticas totales para una distancia recorrida. La distancia corresponde a la velocidad multiplicada por el tiempo; el tiempo equivale a la distancia que el cuerpo cae bajo la atracción gravitatoria elevada a la potencia 1/2. La distancia a la que cae el cuerpo guarda proporción con la longitud del cuerpo o su altura, que a su vez es igual al cociente entre la masa y la densidad del cuerpo, elevado a 1/3. Se tomó una densidad de 1000 kilogramos por metro cúbico para todos los animales. Las pérdidas horizontales dependen en gran medida del rozamiento con el aire, que a su vez depende de la densidad del aire, cuyo valor se aproximó a un kilogramo por metro cúbico.

El cálculo de la velocidad óptima a partir de todos estos factores lleva a una fórmula donde la única variable es la masa corporal: $M^{0,17}$. De modo similar, hemos demostrado que la fuerza neta que genera un animal para moverse a su velocidad óptima es un múltiplo —típicamente el doble— de su masa.

La carrera

Si se considera la carrera de la misma manera que el vuelo —es decir, como un movimiento intermitente optimizado en el campo gravitatorio terrestre—, se predicen también la velocidad y la frecuencia de trote de todos los animales corredores.



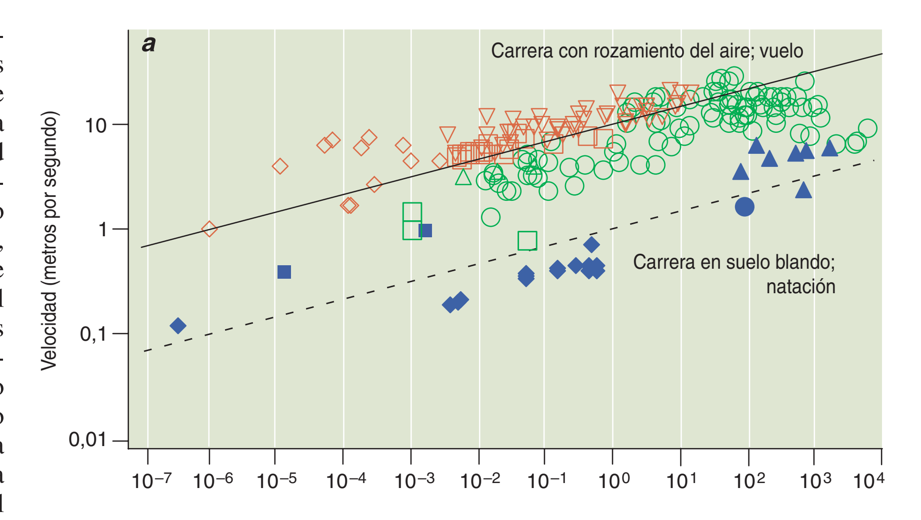


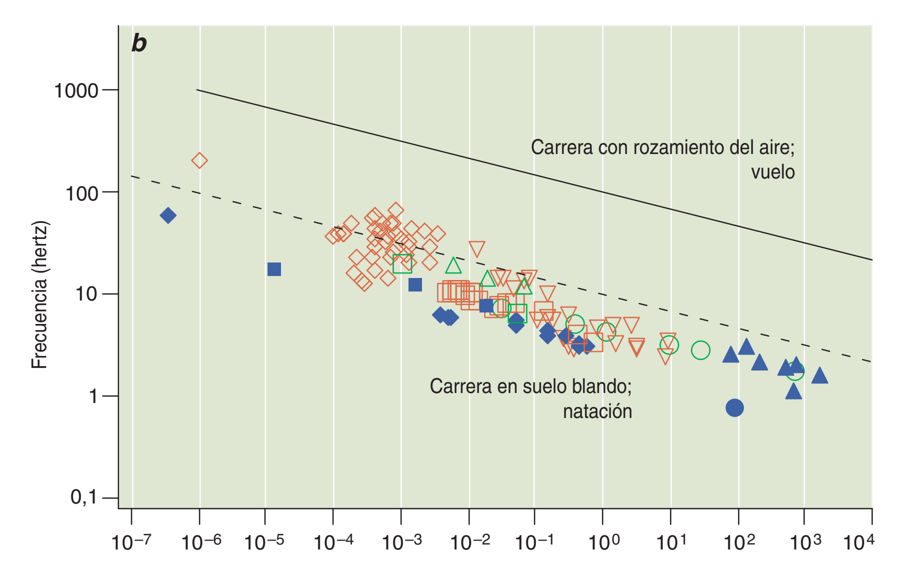
6. UNA TRUCHA NADA LENTAMENTE hacia adelante en una corriente suave. Un sedal la mantiene cerca de la superficie. Se observa la elevación de la superficie acuosa debida al movimiento de avance del pez. Esta elevación se revela en un arco que se forma delante del vertebrado. Cuando éste se mueve a mayor profundidad, el desplazamiento vertical del agua debido a la natación se reparte en una superficie mayor, lo que dificulta su percepción.

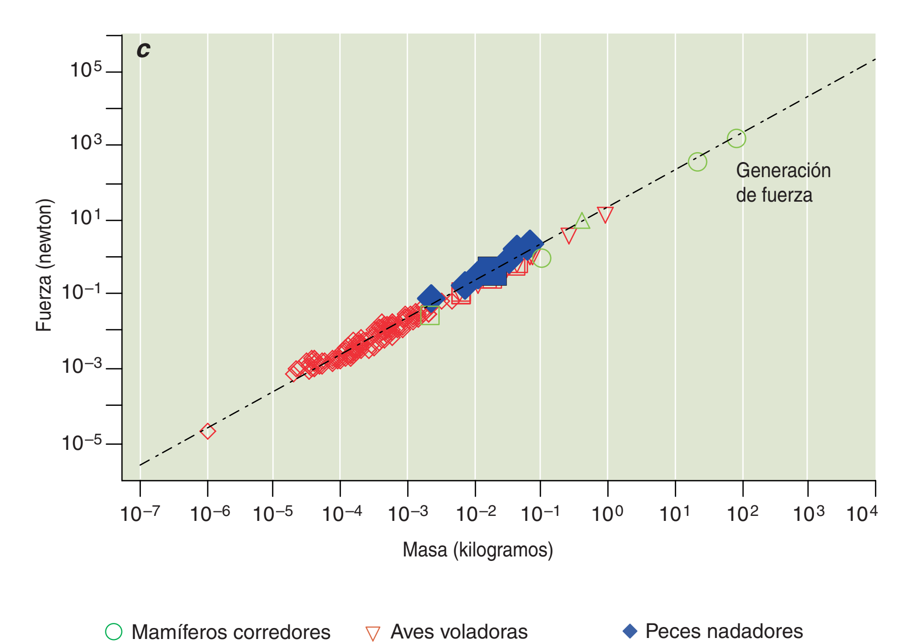
STEPHANIE FREESE (*arriba*); JAMES A. MARDEN, *Universidad Estatal de Pensilvania* (*abajo*)/*American Scientist*

La carrera consta de una sucesión de ciclos que comportan dos pérdidas energéticas. Una proviene de elevar el peso del cuerpo a cierta altura, que se toma como la longitud del cuerpo (alrededor de la longitud de los miembros); este trabajo corresponde a la pérdida vertical, porque, cuando el cuerpo toca de nuevo el suelo, la energía potencial gravitatoria se pierde en las patas y la tierra. (Por mor de simplificación se desprecia el almacenamiento elástico durante la fase de contacto con el suelo.) La otra pérdida es la horizontal: el trabajo que se realiza para vencer el rozamiento contra el suelo, contra el aire circundante y el rozamiento interno entre las distintas partes del animal (de nuevo, para simplificar, se considera externa toda la fricción).

Las pérdidas horizontal y vertical compiten entre sí; cuando se equilibran, la suma es mínima. El movimiento intermitente optimizado que corresponde a la carrera se caracteriza, asimismo, por una velocidad proporcional a $M^{0,17}$ y una frecuencia de zancada proporcional a $M^{-0,17}$ (ambas expresiones se obtienen por



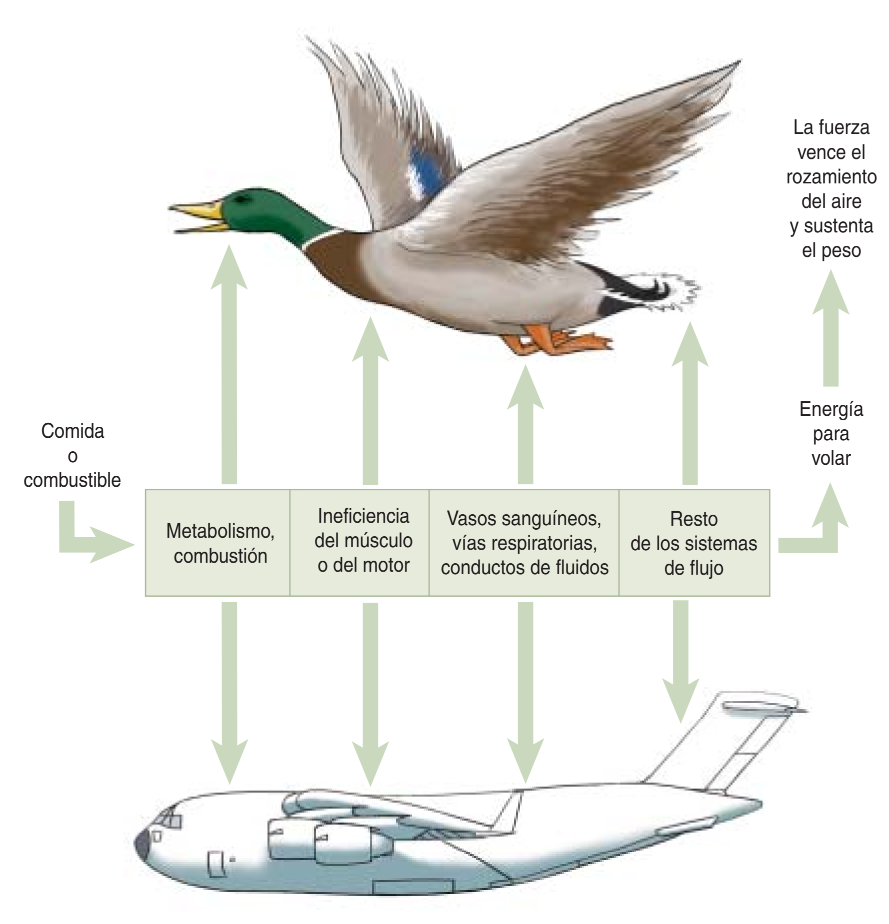




○ Mamíferos corredores
△ Lagartos corredores
□ Artrópodos corredores
▽ Aves voladoras
□ Murciélagos voladores
◇ Insectos voladores
◆ Peces nadadores
▲ Mamíferos nadadores
■ Crustáceos nadadores
● Hombre nadando

7. COMPARACION de las predicciones de la teoría construccional con los datos experimentales para la velocidad, la frecuencia de zancada o de batido y la generación de fuerza, en diversas especies. Las líneas continuas en estos gráficos logarítmicos representan los valores teóricos para la velocidad (*a*) o la frecuencia (*b*), calculados a partir de la masa de animales voladores o de animales corredores allí donde el suelo es duro y, por tanto, la principal pérdida por rozamiento se debe a la fricción del aire. Las líneas de trazos corresponden a las predicciones para la velocidad (*a*) o la frecuencia (*b*) calculadas a partir de la masa de animales nadadores o de animales corredores que se mueven sobre suelo blando, caso en que la principal pérdida por rozamiento se debe a la deformación del suelo. La línea discontinua de trazos y puntos representa la generación de fuerza predicha a partir de la masa del animal (*c*). En las predicciones teóricas se desprecian constantes comprendidas entre 0,1 y 10, por lo que es de esperar una precisión de un orden de magnitud.

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*



8. DURANTE EL VUELO se gasta toda la energía útil comunicada al sistema: se distribuye en componentes que desempeñan funciones equivalentes en animales y aparatos. La teoría construccional predice que todas las estructuras de sistemas de flujos resultan de un punto medio entre dos objetivos opuestos: llevar sustancias desde el centro hasta la periferia y evitar las fugas de estas sustancias y de energía (como el calor) al medio. El propósito final de la comida o del combustible ingerido por un ave o un aeroplano consiste en proporcionar energía para el vuelo, que debe vencer el rozamiento del aire y sustentar en el aire al animal o al aparato. Entre la entrada de combustible y el rendimiento energético de salida, la energía se va perdiendo a través de diversos sistemas de flujo.

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

un procedimiento similar al descrito a propósito del vuelo).

De este modelo de la carrera se derivan predicciones robustas. La pérdida horizontal puede estar dominada por la fricción seca contra una sustancia dura, la deformación permanente de una sustancia blanda como la arena, el barro o la nieve, o la resistencia del aire. Todos estos efectos repercuten en la velocidad y la frecuencia; e influyen más o menos por igual. Si la resistencia del aire es el mecanismo dominante de la pérdida horizontal, la velocidad y la frecuencia se desvían en sólo un factor de 10 de lo que sucede si el animal debe vencer una fricción seca y la deformación del suelo.

El cálculo del trabajo empleado en levantar del suelo el cuerpo deparó otra sorpresa. Para los animales corredores y los voladores, la fuerza promedio que se ejerce en una zancada o en un batido de alas debería ser el doble de su peso. Esto concuerda con las mediciones de la relación entre fuerza y peso en todos los tamaños corporales, para los animales que vuelan y corren. Así pues, en cuanto a movimiento intermitente optimizado, la carrera guarda semejanza con el vuelo.

La natación

¿Opera la natación como la carrera y el vuelo? La respuesta obvia es que no, pues los movimientos de los cuerpos con flotabilidad neutra no parecen tener nada que ver con la gravedad. Este enfoque ha impedido, hasta la fecha, el desarrollo de una teoría física de la locomoción que incluyera la natación.

La razón por la que correr no es tan distinto de nadar o volar (a pesar de que los animales acuáticos o voladores no toquen tierra) es que el suelo soporta el peso de todo cuerpo que se encuentre sobre él. Sirve también el suelo de referencia respecto a la que se impulsan todos los cuerpos en movimiento; sin él no habría locomoción posible.

En la natación, con un fondo enorme y estacionario de masa acuática, el pez se propulsa y mueve su cuerpo con relación al suelo mediante la realización de un trabajo contra la gravedad y el rozamiento, lo mismo que un ave o un antílope.

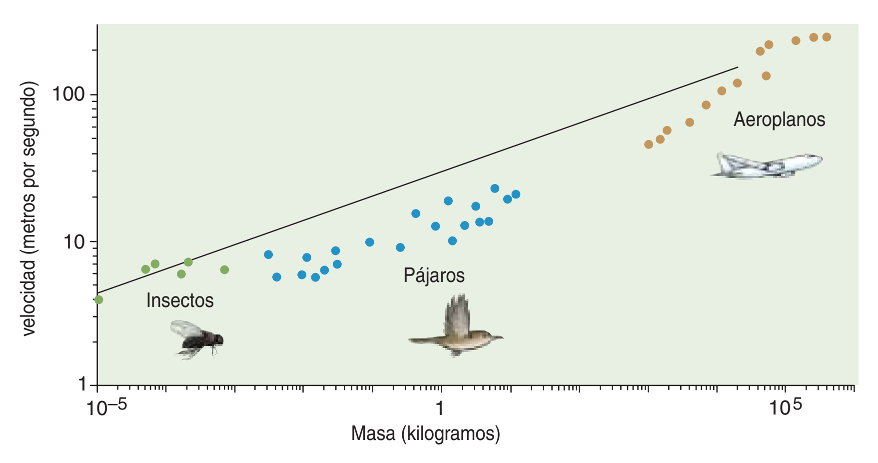
Para avanzar en dirección horizontal una distancia igual a la longitud de su cuerpo, un animal acuático debe realizar un trabajo equivalente al que se requiere para elevar una porción de agua de su mismo tamaño hasta una altura aproximadamente igual a la longitud de su cuerpo. Esta masa de agua debe elevarse porque la única forma que tiene el líquido de fluir en torno al animal, o alrededor de cualquier objeto, es mediante un desplazamiento vertical neto. El agua es incompresible; el terreno bajo el agua inmóvil. Sólo la superficie libre es deformable. Lo observamos en la onda generada ante un cuerpo que se mueve cerca de la superficie del agua; sin embargo, hasta ahora se ignoraba que ese trabajo vertical fuera decisivo para la física de la natación a cualquier profundidad.

¿Por qué no se percibe tal deformación de la superficie libre que causa cualquier pez al levantar el agua sobre sí mismo para desplazarse en dirección horizontal? Porque, en su mayoría, se trata de peces pequeños que nadan en las profundidades. El agua elevada corresponde al volumen desplazado por la superficie libre en su ascenso por una zona extensa, tanto mayor cuanto mayor sea la profundidad de natación. La elevación del agua resulta visible sólo cuando hablamos de un pez grande que nada cerca de la superficie. El fenómeno de la elevación de la superficie acuosa se conoce y emplea en la guerra naval. Ciertos sistemas de radar detectan los submarinos en movimiento merced a la alteración de

la superficie del agua que producen al andar.

La teoría construccional explica así la natación. Sus predicciones para la velocidad y la frecuencia de batido son las mismas que para la carrera sobre un terreno deformable; concuerdan con gran cantidad de datos experimentales.

Por consiguiente, aunque algunos animales ni siquiera tocan el suelo, del mismo se sirven para autopropulsarse. El batido de las alas de los pájaros produce vórtices de aire que acaban por extinguirse contra el suelo e incrementan la presión que el suelo soporta. El agua que levanta el pez al nadar induce una elevación local de la superficie libre y una mayor presión sobre el fondo del lago. El suelo percibe, y soporta, cualquier cosa que se mueva, sin importar el medio por el que se desplace un determinado animal.



9. PREDICCIONES DE LA TEORIA CONSTRUCCIONAL obtenidas a partir de la masa. Abarcan desde los animales hasta las máquinas construidas por el hombre. La relación entre la fuerza y la masa de los motores rige también para todos los tipos de locomoción animal. Este gráfico logarítmico muestra una relación de escala directa entre animales voladores (insectos y aves) y aeroplanos. La línea continua corresponde a la velocidad predicha por la teoría construccional; los puntos representan los valores de la velocidad y de la masa medidos en insectos (*verde*), aves (*azul*) y aeroplanos (*marrón*).

Con números

Hemos comparado los valores predichos por la teoría construccional para la velocidad, la frecuencia de zancada o de batido y la generación de fuerza con los datos empíricos de una amplia gama de animales. Todos los exponentes de escala para la masa teóricos reposan sobre la hipótesis de la similaridad geométrica; es decir, hemos idealizado toda forma animal a una esfera. No obstante, respecto a esta hipótesis se dan pequeñas variaciones, que suelen constituir la norma más que la excepción en toda la literatura sobre las relaciones de escala del mundo animal. La envergadura de las aves evidencia una notable disparidad de su semejanza geométrica. Dado que las aves grandes cuentan con unas alas de mayor longitud, deberían manifestar un factor de escala entre la masa y la frecuencia de aleteo todavía más negativa que la predicha por nuestro modelo.

En general, las pendientes de las relaciones de escala empíricas varían en razón de las especies muestreadas, las diferencias taxonómicas en el escalado de las dimensiones corporales, tipo de estudio del comportamiento animal, metodología empleada y supuestos estadísticos.

Así, aunque no encontramos pruebas estadísticas que respalden con minuciosidad las relaciones de escala predichas para todo el rango estudiado, el exponente de escala teórico se ajusta siempre a los resultados experimentales que cabría esperar. Los datos se hallan dentro del orden de magnitud de las predicciones, lo que cuadra con las expectativas de un análisis dimensional donde todas las constantes entre 0,1 y 10 se despreciaron. Teniendo en cuenta que esta teoría emplea sólo la densidad, la gravedad y la masa, y ningún parámetro de ajuste, la concordancia resulta sorprendente.

Ramificaciones

Hemos expuesto cómo este enfoque termodinámico predice algunas características del diseño animal. Ello nos lleva a pensar que, si la historia de la evolución volviera a repetirse, y volvieran a aparecer seres que corren, nadan y vuelan, el proceso debería producir en tales organismos las mismas velocidades, frecuencias de zancada o de batido y generación de fuerza que los que observamos en las formas de locomoción actuales.

La teoría se utilizaría también para predecir la evolución verosímil de dichas variables en otros planetas con fuerzas gravitatorias distintas o diferentes densidades de los medios líquido y gaseoso.

Los humanos solemos movernos por relieves dispares. Ajustamos nuestra velocidad y frecuencia de zancada en consonancia con el lugar. De forma consciente e inconsciente, prestamos atención a la eficacia de nuestras pautas de movimiento; puede que la selección de la marcha óptima esté integrada en nuestro organismo. Cuando los astronautas caminaron por la Luna, se encontraban sometidos a una fuerza gravitatoria muy diferente de la acostumbrada; sería interesante ver si su velocidad y frecuencia de salto coinciden con las predicciones de nuestra teoría.

La teoría construccional no resulta válida sólo para los animales, sino que describe también los aparatos fabricados por el hombre. La relación entre fuerza y masa de los motores es la misma que opera en los organismos corredores, nadadores y voladores. La teoría construccional del vuelo animal predice, además, la velocidad del vuelo propulsado. Reúne lo natural con lo artificial.

La teoría se aplica al diseño de robots exploradores que operen en otros planetas o lugares inaccesibles de la Tierra. Resulta de gran utilidad en el diseño de cualquier dispositivo de locomoción nuevo, así como en la mejora de los ya existentes, pues orienta la labor de los ingenieros. Por botón de muestra recordemos qué ocurre con los neumáticos de los automóviles: se deforman a cada rotación, lo que resulta en una pérdida vertical de energía, a la vez que sufren una pérdida horizontal soste-

nida debida a la fricción. Sería interesante averiguar si el diseño de los neumáticos ha alcanzado ya un punto óptimo o si cabe todavía una mejora ulterior. En cuanto a aplicaciones relacionadas con el entretenimiento, nuestras predicciones se utilizarían en las animaciones cinematográficas para precisar la velocidad y la frecuencia de zancada de criaturas como los dinosaurios; así se lograría, por ejemplo, representar con realismo la persecución de un *Tyrannosaurus rex* en pos de un automóvil.

En breve, la teoría construccional parte de la ingeniería y retorna a ella. A partir de la identificación de los principios que dan cuenta de las formas geométricas en los flujos naturales robustecemos nuestra intuición para el diseño y la invención. Una mejor comprensión básica de lo que convierte una estructura en óptima y eficiente lleva a diseños más refinados desde el primer momento de su concepción. Con la teoría construccional la invención se basa en principios, no se limita a remedar la naturaleza; el diseño se aborda con mentalidad científica.

Los autores

Adrian Bejan ocupa la cátedra J. A. Jones de ingeniería mecánica de la Universidad de Duke. **James H. Marden** enseña biología en la Universidad estatal de Pennsylvania.

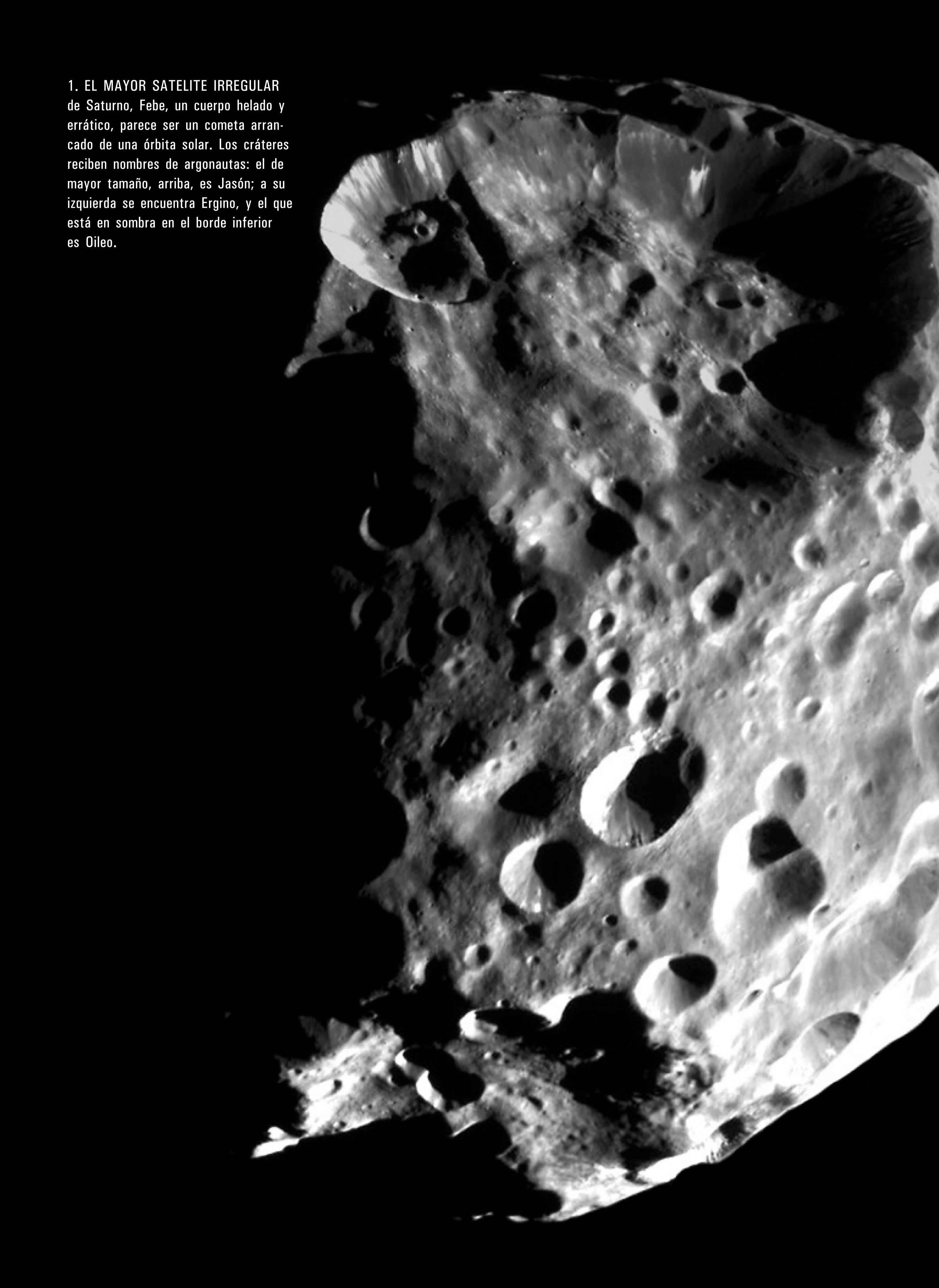
Bibliografía complementaria

SHAPE AND STRUCTURE, FROM ENGINEERING TO NATURE. A. Bejan. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

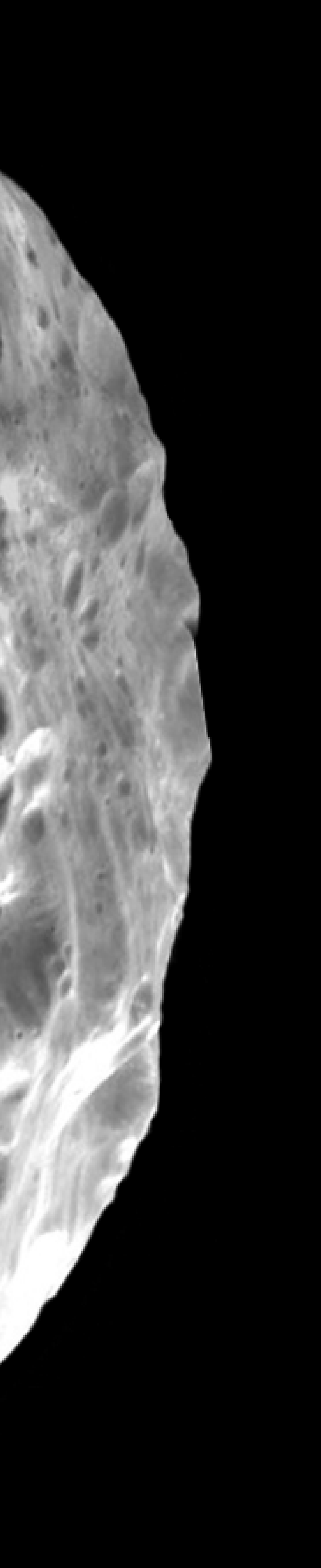
MOLECULES, MUSCLES AND MACHINES: UNIVERSAL CHARACTERISTICS OF MOTORS. J. H. Marden y L. R. Allen en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, vol. 99, págs. 4161–4166; 2002.

SCALING OF MAXIMUM NET FORCE OUTPUT BY MOTORS USED FOR LOCOMOTION. J. H. Marden en *Journal of Experimental Biology*, vol. 208, págs. 1653–1664; 2005.

UNIFYING CONSTRUCTAL THEORY FOR SCALE EFFECTS IN RUNNING, SWIMMING AND FLYING. A. Bejan y J. H. Marden en *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, págs. 238–248; 2006.



1. EL MAYOR SATELITE IRREGULAR de Saturno, Febe, un cuerpo helado y errático, parece ser un cometa arrancado de una órbita solar. Los cráteres reciben nombres de argonautas: el de mayor tamaño, arriba, es Jasón; a su izquierda se encuentra Ergino, y el que está en sombra en el borde inferior es Oileo.



DON DIXON; NASA/JPL/SSI

Satélites irregulares

Estas lunas, caracterizadas por sus órbitas elongadas, ladeadas, muchas veces vueltas sobre sí mismas, iluminan la formación de los planetas

David Jewitt, Scott S. Sheppard y Jan Kleyna

Hace cinco años, a dos de los autores les tocó una noche nublada en los observatorios del Mauna Kea. Para pasar el tiempo, apostaron sobre cuántas lunas quedaban por descubrir en el sistema solar. Jewitt sostenía que una búsqueda telescópica orientada exclusivamente a ese fin encontraría, como mucho, diez. Al fin y al cabo, a lo largo del siglo XX sólo se había dado con unas pocas lunas nuevas. Sheppard, más optimista, predijo un número dos veces mayor; la sensibilidad de los instrumentos astronómicos había mejorado mucho.

Sheppard ganó la apuesta, aunque se quedó corto. Desde aquella noche, nuestro equipo ha descubierto 62 lunas alrededor de los planetas gigantes; hay más hallazgos en camino. Diversos grupos han encontrado otras 24. (En lenguaje astronómico estricto son "satélites" y no "lunas". Sólo existe una Luna, el satélite de la Tierra. Pero incluso los astrónomos adoptan a veces expresiones populares.) Nadie esperaba que la familia del Sol tuviera tantos miembros en la sombra. Se les da la clasificación de "irregulares": tienen órbitas amplias, muy elípticas, inclinadas con respecto a los ecuadores de sus planetas. Las lunas regulares, como la de la Tierra o los satélites galileanos de Júpiter, presentan órbitas más circulares, ceñidas y ecuatoriales.

La mayoría de los satélites irregulares describen órbitas retrógradas; es decir, giran alrededor de su planeta en sentido opuesto a la rotación de éste. Las lunas regulares se caracterizan, en cambio, por sus órbitas pró-

gradas. Así, la Luna, vista desde el polo norte terrestre, viaja en sentido contrario a las agujas del reloj, el mismo sentido en que la Tierra rota sobre su eje y se traslada alrededor del Sol. Los demás planetas proceden también en sentido antihorario; cabe presumir que esa coincidencia refleja el movimiento del disco de gas y polvo del que surgieron los planetas hace 4500 millones de años. Las lunas regulares comparten ese movimiento porque debieron de condensarse en discos de materia que rodeaban a sus planetas respectivos. El comportamiento anómalo de las lunas irregulares da a entender que su génesis fue diferente.

Los modelos ordinarios no ofrecen una explicación cabal de los satélites irregulares. Se trabaja en nuevos planteamientos. Parece que derivan de una época muy lejana, en la que el empuje gravitatorio de los planetas recién formados dispersó o apresó cuerpos pequeños, que perdieron así sus órbitas originales. Su estudio arrojará luz sobre los primeros tiempos del sistema solar.

La oveja negra

Aunque la primera luna irregular conocida, Tritón de Neptuno, se descubrió en 1846, la mayoría ha escapado a la observación porque tienden a ser más pequeñas y, por tanto, más débiles que las regulares. Y para mayor dificultad, se reparten por regiones mucho mayores. El satélite regular más alejado de Júpiter, Calisto, orbita a 1,9 millones de kilómetros del planeta, mientras que las lunas irregulares llegan hasta los 30 millones de kilómetros. Esta distancia es equiparable al tamaño del campo gravitatorio de Júpiter, o esfera de Hill, más allá de la cual el Sol le arrancaría cualquier luna. Si fuera observable a simple vista, la esfera joviana de Hill ocuparía unos 10 grados, 20 veces el diámetro angular de la Luna llena. Es gigantesca, si se compara con los campos de visión de la mayoría de los telescopios.

El rastreo de áreas tan extensas en busca de lunas requiere los detectores digitales mayores y más modernos; deben analizarse hasta 100 gigabytes de datos por noche. Nuestro Estudio Hawai de las Lunas se centró en un principio en Júpiter, cuya cercanía nos permite sondear satélites pequeños que aparecerían demasiado débiles alrededor de los planetas gigantes más distantes. Los equipos dirigidos por Brett Gladman, de la Universidad de la Columbia Británica, Matthew Holman, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, y J. J. Kavelaars, del Instituto Herzberg de Astrofísica del Consejo Nacional de Investigaciones de Canadá, han llevado a cabo exploraciones paralelas de Saturno, Urano y Neptuno.

Los cuatro planetas gigantes, con independencia de su masa, tienen sistemas parecidos de lunas irregulares. La extrapolación de la población conocida hasta ahora arroja que cada planeta podría albergar unas 100 lunas irregulares con diámetros superiores a un kilómetro. El rango de sus tamaños es amplio, pero abundan los más pequeños. En el caso de Júpiter, el rango de tamaños oscila entre la mayor luna irregular, J6 Himalia, de unos 180 kilómetros de diámetro, y objetos de apenas uno o dos kilómetros.

Las órbitas de estas lunas cuentan entre las más complejas del sistema solar. Puesto que se sitúan tan lejos de su planeta, sufren las atracciones gravitatorias del planeta y del Sol; sus órbitas precesan con rapidez, es decir, el eje mayor de la elipse que representa la órbita también gira. La rotación del eje es tan rápida, que ni siquiera puede decirse que estas lunas tracen órbitas cerradas; las extrañas figuras curvadas sobre sí mismas que dibujan recuerdan a las que crea el juego infantil del espirógrafo.

Polirritmo cósmico

Cuando se sincronizan las diversas influencias ejercidas sobre las lunas,

UN ENJAMBRE DE LUNAS

JUPITER
8 regulares; 55 irregulares

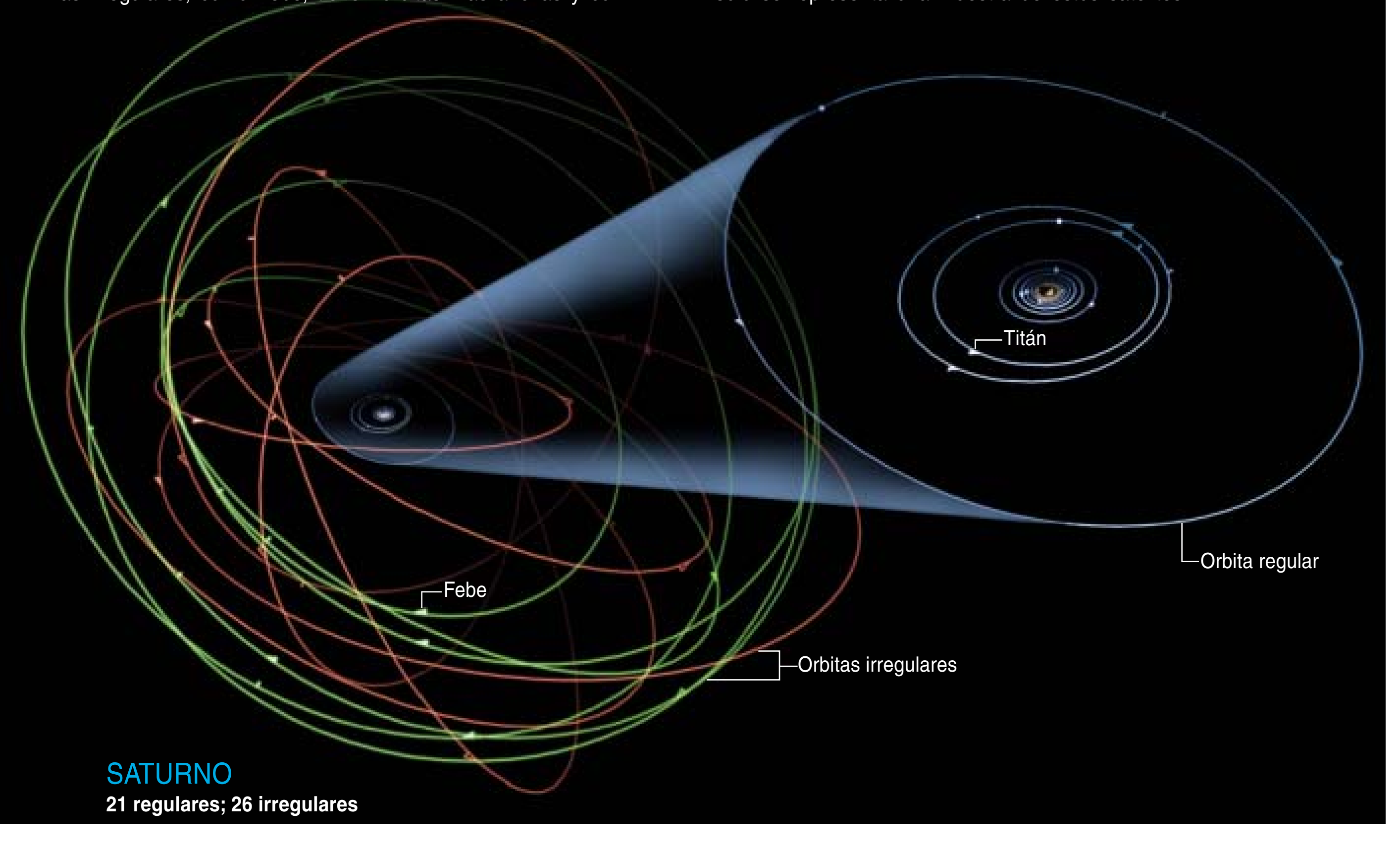
URANO
18 regulares; 9 irregulares

NEPTUNO
6 regulares; 7 irregulares

DON DIXON

Resumen/Los satélites irregulares

- Se creía que la mayoría de las lunas se formaron en discos que rodeaban a sus planetas respectivos, repitiendo en miniatura la formación del sistema solar. Por eso orbitaban casi todas en el mismo plano que el ecuador planetario y en la misma dirección de la rotación del planeta. Se llamaba "irregulares" a las lunas conocidas que no cumplían esos criterios.
- La lluvia reciente de descubrimientos propiciados por los últimos detectores digitales revela que la mayoría de las lunas son irregulares. Sus órbitas elongadas, abiertas e inclinadas indican que no se formaron donde hoy se encuentran, sino en otras regiones, donde orbitaban alrededor del Sol. No son más que asteroides o cometas atrapados por los planetas.
- No se conocen bien ni la región de procedencia ni los mecanismos de captura. Podrían provenir del cinturón de Kuiper, más allá de Neptuno, o de regiones más interiores. Su captura quizá se debiese a choques o interacciones en el sistema solar joven, cuando su población era más densa.



La verdadera extensión del sistema de lunas que rodea a Saturno se ha conocido en los últimos años. Sus satélites se agrupan en dos grandes categorías: las lunas regulares (*azul*), como Titán y Japeto, presentan órbitas cercanas al planeta y casi coplanarias; las irregulares, como Febe, tienen órbitas más anchas y con diversas orientaciones. Algunas de las lunas irregulares orbitan en la misma dirección en que rota Saturno (*rojo*); otras lo hacen en sentido opuesto (*verde*). Sistemas similares rodean a los demás planetas gigantes (*a la izquierda*). En estos diagramas sólo se representa una muestra de estos satélites.

la situación se vuelve especialmente compleja. Si la precesión sigue el mismo paso que el planeta en su órbita alrededor del Sol, se dice que la luna está en resonancia de expulsión. Los restantes efectos de la gravedad solar, modestos, se acumulan con el tiempo, desestabilizando la órbita; la elipse se alarga tanto, que la luna, o choca con el planeta (o con una de las lunas mayores), o sale fuera de la esfera de Hill y penetra en el dominio gravitatorio del Sol. Las órbitas prógradas son más vulnerables que las retrógradas. Si en un principio las lunas irregulares se hallaban por igual en órbitas prógradas que en retrógradas, esta resonancia explicaría por qué la mayoría de ellas son ahora retrógradas.

Otra resonancia, la de Kozai, acompasa la inclinación con la forma de la órbita. Las lunas arrastradas hacia órbitas inclinadas terminan en elipses muy alargadas, lo que conduce de nuevo a la expulsión o la destrucción. Esta podría ser la razón de que no se hayan encontrado lunas con inclinaciones entre los 50 y 130 grados. En resumen: las lunas irregulares que vemos hoy parecen ser las supervivientes tras las interacciones gravitatorias que barrieron a muchas de sus hermanas.

Pero no basta con la gravedad para justificar algunas propiedades orbitales. Las lunas se agrupan en familias, caracterizadas por unas órbitas similares. Las familias de Júpiter, por ejemplo, tienen hasta 17 miembros. Según la interpretación más sencilla, cada familia comprendería los restos de una luna mayor a la que un impacto hizo añicos; hoy conservarían la órbita de ese objeto del que proceden. Si es cierto, muchas de las lunas irregulares que observamos pertenecerían a una segunda generación: serían las descendientes inmediatas de la población inicial.

David Nesvorny, del Instituto de Investigaciones del Sudoeste en Boulder, y sus colaboradores han ejecutado modelos informáticos de las colisiones de las lunas. De sus resultados se desprende que sería raro que una luna colisionase hoy con otra o con un cuerpo interplanetario, un cometa por ejemplo. Por tanto, la mera existencia de las familias apunta a una época más temprana, cuando la población de las lunas irregulares, la de los cometas o ambas eran más numerosas y los choques bastante más frecuentes.

No sólo se sabe ahora más sobre las órbitas de las lunas irregulares. Se ha progresado también en el estudio de otras de sus propiedades. La mayoría de las lunas son tan débiles, que apenas se ha podido examinar su composición. No obstante, Tommy Grav, del Smithsoniano, y Terry Rettig, de la Universidad de Notre Dame, han descubierto que las lunas

de una misma familia tienden a mostrar los mismos colores. Puesto que el color representa la composición, de este descubrimiento cabe deducir un posible origen común. Igualdad de origen que avala la idea de que los miembros del grupo constituyen fragmentos de un mismo cuerpo mayor, ya desaparecido.

Una de las pocas lunas irregulares que se conocen con cierto detalle es Febe, de Saturno. La nave espacial Cassini de la NASA se aproximó a ella en junio de 2004. Tomó imágenes de muy alta resolución en las que se apreciaba una considerable densidad de cráteres sobre la superficie de Febe. Los espectros de la luz solar reflejada revelaron hielos de agua y de dióxido de carbono. Las dos lunas irregulares de Neptuno vistas por la sonda espacial Voyager 2, Nereida y Tritón, tienen también superficies congeladas. Los hielos evidencian que se crearon lejos del Sol, como los cometas. Las lunas irregulares de Júpiter, muy oscuras, parecen desprovistas de hielos, posiblemente porque, al estar más cerca del Sol, el hielo no se estabiliza. En ese sentido, las lunas irregulares de Júpiter se asemejan mucho a los cometas que han perdido los compuestos volátiles.

Arrastre

Las propiedades de las lunas irregulares —en particular sus órbitas retrógradas— sugieren que no se formaron donde hoy se hallan. Igual que asteroides y cometas, parecen restos de los materiales con que se hicieron los planetas. En un principio debieron de orbitar alrededor del Sol, pero luego los capturaron los planetas. Entender cómo ocurrió no es sencillo. La interacción compleja entre gravedad solar y gravedad planetaria empuja una y otra vez asteroides y cometas hacia órbitas efímeras alrededor de los planetas gigantes. Esta captura temporal recuerda a los remolinos de hojas en un viento de otoño. Las hojas se adentran en el remolino, giran con él quizás unas docenas de veces y lo abandonan de manera impredecible.

La captura del famoso cometa D/Shoemaker-Levy 9 (la letra "D" significa "difunto") es un ejemplo del fenómeno en cuestión. El cometa entró en una órbita transitoria alrededor de Júpiter en algún momento del siglo XX y chocó contra ese planeta en 1994. Si no hubiese encontrado ese fin prematuro, D/Shoemaker-Levy 9 habría vuelto a una órbita heliocéntrica en unos cientos de años. Se conocen varios objetos que, tras sobrevivir a una captura temporal alrededor de Júpiter, han vuelto a girar en torno al Sol.

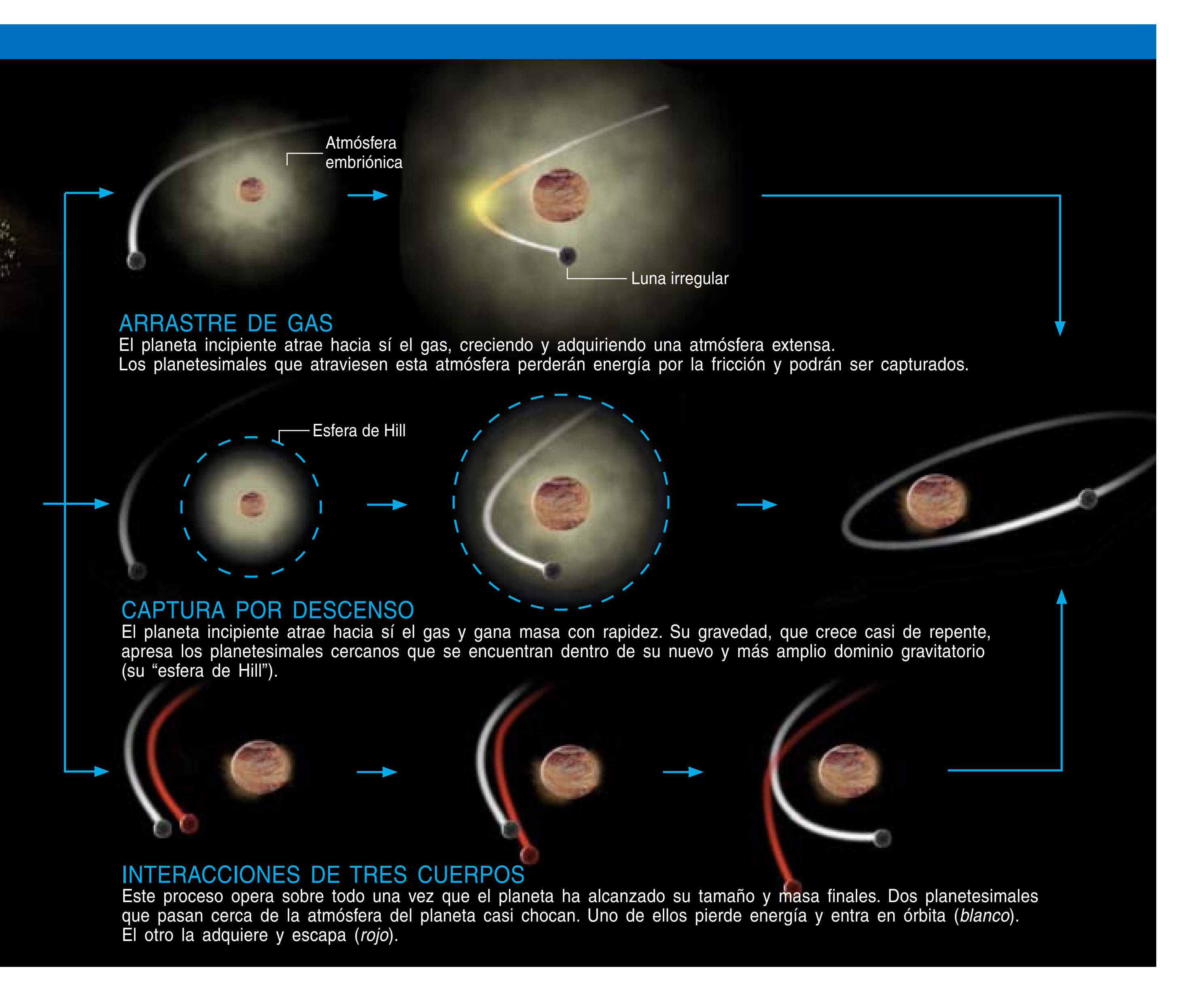
Mas para que abandone por siempre una órbita heliocéntrica y acabe en una órbita estable alrededor de un planeta, un objeto celeste debe perder parte de su energía inicial. Ha de frenarse para no escapar de nuevo. No existe ningún proceso eficiente de disipación de la energía en nuestro sistema solar. La captura de las lunas debió de ocurrir hace mucho tiempo, en un momento en que el sistema solar exhibiese propiedades muy distintas. En los años setenta se propusieron tres mecanismos posibles; todos operaban durante la formación de los planetas o justo después.

Según el primero de esos mecanismos, adelantado por James B. Pollack y Joseph A. Burns, entonces en el Centro Ames de Investigación de la NASA, y Michael E. Tauber, de la Universidad de Cornell, las lunas perdieron energía debido a la fricción que sufrieron al atravesar la inmensa atmósfera de los embriones de los planetas gigantes gaseosos. Júpiter y Saturno, al contrario que la Tierra y los otros planetas terrestres, están compuestos sobre todo de hidrógeno y helio. Es muy probable que se formaran cuando un núcleo de rocas y

CAPTURA DE LUNAS

Las curiosas propiedades orbitales de las lunas irregulares indican que en un principio orbitaron alrededor del Sol y más tarde las capturaron los planetas a cuyo alrededor giran ahora. Se han propuesto tres mecanismos de captura.
En los tres, la fase inicial es la formación de planetesimales, cuerpos del tamaño de un asteroide. La agrupación de muchos crea los núcleos rocosos de los planetas gigantes. Los demás pueden llegar a ser capturados.

DON DIXON



hielo, con unas diez veces la masa de la Tierra, arrastró grandes cantidades de gas del disco primordial que rodeaba un Sol joven. Antes de alcanzar la configuración compacta con que hoy los conocemos, esos planetas podrían haber pasado por una fase transitoria más difusa, en la que sus atmósferas llegaban cientos de veces más lejos que hoy.

Los asteroides o cometas que se acercasen a uno de esos planetas tuvieron que correr una de tres suertes diferentes, dependiendo de su tamaño. Los menores ardieron dentro de la atmósfera planetaria expandida, cual si se tratara de un meteorito. Los mayores la atravesaron sin impedimentos y siguieron girando alrededor del Sol. Los de tamaño intermedio se frenaron y se los capturó. Se trata de una versión natural del frenado atmosférico con el que muchas naves espaciales entran en órbita.

Uno de los problemas de la hipótesis de la fricción gaseosa es que no explica la presencia de satélites irregulares alrededor de Urano y Neptuno. Estos planetas no son gigantes de gas; en ellos predominan las rocas y los hielos, cubiertos por modestas capas de hidrógeno y helio. Debido a su mayor lejanía del Sol y a la consiguiente menor densidad del material presente en las regiones externas del disco circumsolar, los núcleos de esos planetas habrían necesitado más tiempo para alcanzar una masa que precipitase la contracción del gas. Antes de que sucediera, la nebulosa solar ya se habría disipado. Por tanto, ni Urano ni Neptuno desarrollaron nunca atmósferas extensas. ¿Cómo iba a intervenir el arrastre gaseoso, si no había gas para ello?

Tres son multitud

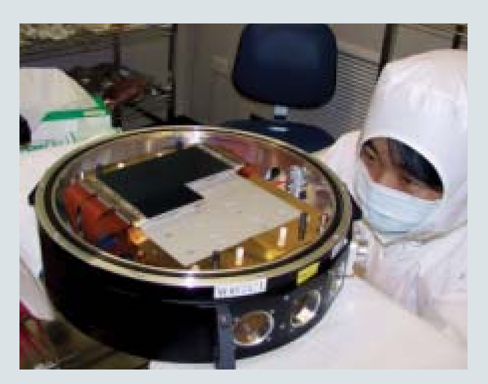
El segundo mecanismo también incorpora la captura durante la fase de crecimiento planetario. La acumulación de gas sobre los núcleos de los gigantes gaseosos se habría ido reforzando a sí misma, con el consiguiente aumento acelerado de la masa. La esfera de Hill habría crecido bruscamente. Los asteroides y demás objetos que se encontrasen cerca en el momento del crecimiento desbocado se habrían visto atrapados por la rápida expansión del campo gravitatorio de los planetas. Expusieron este mecanismo de captura Thomas A. Heppenheimer y Carolyn

Observadores del cielo

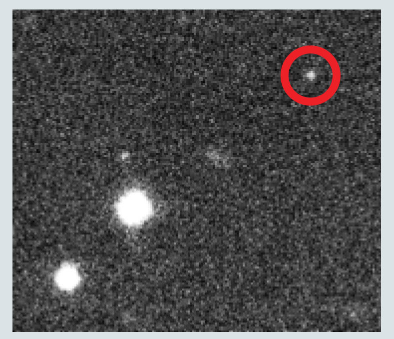
Lejanas, pequeñas, de escaso brillo: pocos objetos son más difícil de observar en el sistema solar que las lunas irregulares. Para encontrarlas se necesitan los telescopios rastreadores más poderosos (instrumentos que barren amplios sectores del cielo, sin concentrarse en áreas pequeñas). Nuestro equipo ha cosechado el mayor número de descubrimientos de lunas irregulares. Hemos utilizado los telescopios Subaru y Canadá-Francia-Hawai, ambos en Mauna Kea (Hawai). Están equipados con detectores digitales de más de 100 millones de píxeles.

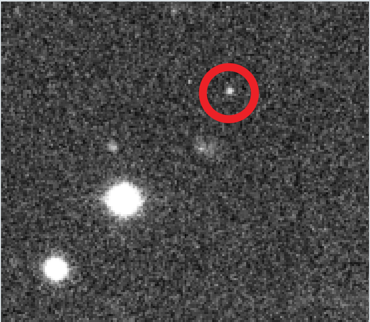
La dificultad estriba en distinguir entre objetos del sistema solar y cuerpos de las galaxias y estrellas lejanas. Se emplean dos métodos. El primero mide distancias: se comparan tres imágenes de la misma región espaciadas en el tiempo; durante ese lapso la Tierra se ha movido alrededor del Sol, nuestra posición cambia y los objetos parecen haberse desplazado; cuanto más cerca esté el astro, más parecerá que se ha movido.

El segundo método mide velocidades. Tomamos decenas de imágenes de un campo, las desplazamos dependiendo de la velocidad orbital que les suponemos a las lunas irregulares que buscamos y las sumamos. En la imagen suma final las estrellas de fondo aparecen como rayas y las lunas irregulares como puntos brillantes. Puesto que este método utiliza más imágenes de una región determinada del cielo es más sensible a los objetos débiles que el primer método, pero necesita un tiempo mayor para llevar a cabo una exploración completa. Para asegurarnos de que los cuerpos encontrados son lunas y no asteroides o cometas, los seguimos durante varios meses y trabajamos con Brian Marsden, del Smithsoniano; así comprobamos si orbitan alrededor de sus respectivos planetas.



1. PARA EXPLORAR GRANDES REGIONES del cielo uno de los mejores instrumentos es la Cámara de Foco Primario del Subaru, un mosaico de 10 detectores CCD de ocho megapíxeles cada uno.





2. UNA PEQUEÑA MOTA DE LUZ en movimiento: el satélite de Júpiter S/2003 J14 se descubrió el 26 de febrero de 2003 gracias a estas dos imágenes separadas unos 39 minutos. Los otros objetos son estrellas de fondo. Esta luna, de unos dos kilómetros de diámetro, dibuja una órbita que se aleja 31 millones de kilómetros del planeta gigante.

Porco, por entonces en el Instituto Tecnológico de California. Lo llamaron, un tanto confusamente, "captura por descenso".

Sin embargo, y al igual que el arrastre de gas, este mecanismo no explica tampoco la existencia de las lunas de Urano y Neptuno, ya que ninguno de los dos planetas conoció un crecimiento repentino de su masa. La mayoría de los modelos predicen que esos planetas se desarrollaron de forma paulatina, mediante la acumulación de asteroides y cuerpos de tamaño cometario. Tardaron decenas o cientos de millones de años en alcanzar su masa actual. Júpiter y Saturno tendrían que haber adquirido su masa en sólo unos milenios para que se diese la captura "por descenso"; un plazo tan breve incomoda a muchos teóricos. Según un modelo alternativo de la génesis de Urano y Neptuno, propuesto por Alan Boss, del Instituto Carnegie de Washington, los dos planetas eran al principio tan pesados como Júpiter y Saturno, pero la radiación ionizante de estrellas cercanas de gran masa redujo su masa. Más difícil resulta explicar la existencia de las lunas irregulares con este modelo: al perder masa, un planeta tendería a perder también satélites, no a capturarlos.

Lo mismo en el modelo de la captura por arrastre de gas que en el de la captura "por descenso", los planetas se anexionaron las lunas irregulares pronto, posiblemente antes de que la Tierra hubiera alcanzado un estado reconocible. Bepi Colombo y Fred Franklin, entonces en el Smithsoniano, habían propuesto en 1971 una tercera hipótesis, muy diferente: el choque de dos cuerpos dentro de la esfera de Hill de un planeta puede disipar energía suficiente para que el planeta capture a uno de ellos. Esta "captura por interacciones de tres cuerpos" apenas mereció atención durante los siguientes 35 años, quizá porque estas colisiones son muy raras hoy día.

Sin embargo, la investigación ha acabado por demostrar que no se necesita ninguna colisión. Los tres cuerpos sólo deben interactuar gravitatoriamente. Si intercambian energía entre ellos, uno puede ganarla a expensas de los otros dos. El proceso es una versión magnificada de la "honda" gravitatoria con la que se envían sondas al espacio profundo. Craig Agnor, de la Universidad de California en Santa Cruz, y Doug Hamilton, de la Universidad de Maryland, han propuesto otra modalidad de captura por interacciones de tres cuerpos, que disocia un objeto binario, expulsa uno de sus componentes y atrapa el otro.

Los movimientos planetarios

La captura por interacciones de tres cuerpos resulta atractiva a la

luz de los nuevos descubrimientos que confirman que los cuatro planetas gigantes tienen un séquito de lunas irregulares, ya que vale para los gigantes gaseosos y para los de hielo. No requiere envolturas gaseosas masivas ni crecimientos planetarios desbocados; le basta un número suficiente de colisiones o de encuentros cerca de los planetas. Este tipo de interacciones sería más probable casi al final de la época de la formación planetaria, una vez se hubieron desarrollado las esferas de Hill hasta adquirir las proporciones actuales, aunque antes de que desaparecieran los restos de la formación de los planetas. La captura de tres cuerpos podría incluso explicar por qué esos planetas se acompañan de casi el mismo número de lunas irregulares: aunque Urano y Neptuno no tienen tanta masa como Júpiter o Saturno, distan más del Sol y, en consecuencia, el tamaño de sus esferas de Hill es equiparable al de las esferas de Hill de esos dos astros mayores.

Aunque las interacciones de tres cuerpos pueden justificar la captura de las lunas irregulares, queda por aclarar de dónde procedían éstas. Se han adelantado dos posibilidades. Las lunas podrían ser asteroides y cometas formados en la misma región del sistema solar donde se crearon los planetas que finalmente las adoptaron. La mayoría de esos cuerpos se integraron en los planetas o salieron del sistema solar. Las lunas irregulares corrieron mejor suerte: ni las engulleron los planetas, ni quedaron condenadas a vagar por el espacio interestelar.

La segunda posibilidad emerge de una hipótesis reciente, según la cual el sistema solar conservó su disco de desechos hasta unos 700 millones de años después de la formación de los planetas. Las intensas interacciones gravitatorias entre Júpiter y Saturno provocaron unas oscilaciones que sacudieron el sistema solar entero. Miles de millones de asteroides y cometas se dispersaron, mientras los planetas gigantes se bamboleaban hasta adquirir sus órbitas actuales, más estables. Una pequeña fracción de los objetos dispersados pudo ser capturada. Conforme a este esquema, propuesto por K. Tsiganis y sus colaboradores del Observatorio de la Costa Azul, la mayoría de los cuerpos dispersados se habría formado más allá de Neptuno, en el cinturón de Kuiper.

Los estudios espectrales quizá puedan comprobar alguna vez estas dos hipótesis. Que las lunas irregulares de los distintos planetas presentasen composiciones diferentes favorecería la primera hipótesis, según la cual las lunas se forman cerca de sus planetas. Si, por el contrario, tienen composiciones similares, saldría ganando la segunda, la que sostiene que las lunas se formaron juntas y luego fueron dispersadas. Por lo tanto, las lunas podrían hacernos saber si el sistema solar sufrió un reajuste turbulento.

La exploración de los sistemas de lunas irregulares sigue en marcha. Hay un par de aspectos que ya están claros. El primero, que la captura de estas lunas tuvo que suceder en los primeros tiempos del sistema solar, bien durante la formación de los planetas, bien como secuela inmediata: el sistema solar actual no ofrece ningún mecanismo que pueda explicar la captura de las lunas. El segundo, que las similitudes entre las poblaciones de lunas irregulares de los cuatros planetas exteriores indican que su existencia se debe a las interacciones de tres cuerpos, el único mecanismo conocido tan efectivo en Neptuno como en Júpiter.

Al igual que las huellas de los neumáticos sobre el asfalto tras un accidente, las lunas irregulares que giran alrededor de los planetas gigantes nos proporcionan indicios sobre sucesos del pasado que no hemos podido presenciar directamente.



NASA/JPL

2. TRITON, la mayor luna irregular de Neptuno, no ha dejado de desconcertar a los astrónomos, desde su descubrimiento en 1846. Según investigaciones recientes, giraba, junto a una compañera, en órbita alrededor del Sol hasta que Neptuno separó ambos satélites y atrapó a Tritón.

Los autores

David Jewitt, Scott S. Sheppard y **Jan Kleyna** son prolíficos descubridores de lunas planetarias. Jewitt enseña en la Universidad de Hawai. Sheppard investiga en el departamento de magnetismo terrestre del Instituto Carnegie de Washington. Kleyna trabaja en la Universidad de Hawai.

Bibliografía complementaria

THE DISCOVERY OF FAINT IRREGULAR SATELLITES OF URANUS. J. J. Kavelaars y col. en *Icarus*, vol. 169, n.º 2, págs. 474-481; junio, 2004.

DISCOVERY OF FIVE IRREGULAR MOONS OF NEPTUNE. Matthew J. Holman y col. en *Nature*, vol. 430, n.º 7002, págs. 865-867; 19 de agosto, 2004.

PHOTOMETRY OF IRREGULAR SATELLITES OF URANUS AND NEPTUNE. Tommy Grav, Matthew J. Holman y Wesley C. Fraser en *Astrophysical Journal*, vol. 613, n.º 1, págs. L77-L80; septiembre, 2004.

IRREGULAR SATELLITES IN THE CONTEXT OF GIANT PLANET FORMATION. David Jewitt y Scott Sheppard en *Space Science Reviews*, vol. 116, n.os 1-2, págs. 441-456; enero, 2005.

CASSINI IMAGING SCIENCE: INITIAL RESULTS ON PHOEBE AND IAPETUS. C. C. Porco y col. en *Science*, vol. 307, págs. 1237-1242; 25 de febrero, 2005.

NEPTUNE'S CAPTURE OF ITS MOON TRITON IN A BINARY-PLANET GRAVITATIONAL ENCOUNTER. Craig B. Agnor y Douglas P. Hamilton en *Nature*, vol. 441, págs. 192-194; 11 de mayo, 2006.



Pseudogenes

La historia de estas reliquias moleculares repartidas por el genoma humano no deja de sorprendernos

Mark Gerstein y Deyou Zheng

Nuestro armario genético esconde más de una reliquia. Desparramados por nuestros cromosomas, se hallan los pseudogenes, “esqueletos” de genes que llevan mucho tiempo “muertos”. Lo mismo que otros fósiles, iluminan la historia evolutiva de las formas actuales. Pero si atendemos a los hallazgos recientes, algunos de tales fósiles de ADN gozan todavía de buena salud. Los signos de actividad pseudogénica nos recuerdan que, aunque el proyecto para la secuenciación del genoma humano (el conjunto completo de información génica que encierran los núcleos de nuestras células) ha terminado oficialmente, apenas hemos empezado a desentrañar su complejidad.

Sabemos que un genoma guarda mayor semejanza con un sistema operativo para un ser vivo que con una librería estática de información. Siguiendo la analogía informática, los pseudogenes pueden considerarse vestigios de un viejo código para hábitos ya desaparecidos; pero también constituyen un registro fascinante, inserto en el programa general, del crecimiento y diversificación del programa en el transcurso del tiempo. Al tratarse de productos de la remodelación y actualización genómicas, los pseudogenes arrojan luz sobre procesos dinámicos, amén de ofrecer pistas acerca de su propia función, posiblemente activa, en nuestro genoma.

Copiados, que no falsos

Los genes “falsos” parecen genes reales, pero no desarrollan ninguna función conocida. Descubiertos a finales de los años setenta del siglo pasado, se les llamó pseudogenes. Con ellos dieron los primeros cazadores de genes en su empeño por localizar con precisión las posiciones cromosómicas asociadas a la producción de moléculas de interés. Así, en la búsqueda del gen responsable de la síntesis de la globina beta (componente crucial de la hemoglobina, la molécula que transporta oxígeno por todo el torrente circulatorio), se identificó una secuencia de ADN que parecía un gen de globina. Sin embargo, no podía dar lugar a una proteína: había partes funcionales esenciales que se encontraban inutilizadas debido a mutaciones, lo que impedía que la maquinaria celular tradujera el gen en una molécula eficaz.

Sólo la más reciente conclusión de los proyectos de secuenciación que han cubierto la totalidad del genoma humano y de otros organismos ha ofrecido una panorámica del paisaje

DAVE CUTLER STUDIO

genómico. Los resultados muestran un genoma salpicado de esas rarezas. El genoma humano consta de más de tres mil millones de pares de nucleótidos, los componentes de las moléculas de ADN. Pero no llega al 2 por ciento nuestro ADN genómico codificador de proteínas. Una tercera parte corresponde a intrones, secuencias intragénicas sin función codificadora. Los segmentos intergénicos restantes constituyen la mayor porción de nuestro ADN; gran parte del mismo corresponde a materia genómica oscura, cuya función constituye un misterio. En esas extensiones del genoma, aparentemente áridas, la mayoría de los pseudogenes se encuentran repartidos, como si de piezas de chatarra se tratara, al azar y en cantidades sorprendentes.

Nuestro grupo de investigación, junto con otros de Europa y Japón, ha identificado más de 19.000 pseudogenes. Irán apareciendo más. Se cifra en 21.000 los genes codificantes de proteínas que los humanos poseemos. Los pseudogenes podrían algún día superar en número a sus equivalentes funcionales. Semejante predominio ha planteado múltiples cuestiones: ¿Cómo se originaron? ¿A qué se debe su abundancia? Si realmente carecen de utilidad, ¿por qué han permanecido en nuestro genoma durante tanto tiempo?

La respuesta a la primera cuestión se conoce ya bastante bien. Se cree que una pequeña fracción de los pseudogenes corresponde a antiguos genes funcionales que "murieron" por cambios en su secuencia nucleotídica, que los incapacitaron. La mayoría de los pseudogenes, sin embargo, son duplicados inútiles de genes operativos. Podrían haber "fallecido" desde su formación, al sufrir un daño letal durante el proceso de copia, o quizás acumularon mutaciones debilitantes que terminaron por inutilizarlos.

Para que un gen funcione, su anatomía debe incluir tramos ininterrumpidos de nucleótidos (exones), que se corresponden con secuencias de aminoácidos de la proteína cifrada. Los exones se hallan separados por secuencias sin función codificadora (intrones). El inicio de un gen está marcado por el segmento promotor; a él recurre la maquinaria celular para reconocer el gen en un cromosoma. Cuando una célula expresa un gen, empieza por reclutar, en el sitio del promotor, componentes moleculares esenciales; éstos viajan a lo largo de todo el gen, transcribiéndolo en una copia preliminar de ARN. Un proceso de corte y empalme ("splicing") poda luego los intrones del transcrito primario y une las secuencias exónicas entre sí para producir una versión del gen que es ya un ARN mensajero (ARNm) maduro. Un ribosoma lee entonces la secuencia del ARNm; la traduce en una cadena de aminoácidos que forman una proteína, la molécula encargada de cumplir la función del gen.

Los pseudogenes se originan por dos vías. Por un lado, la duplicación: justo antes de dividirse, una célula duplica su genoma entero; durante el proceso, una copia extra de un gen se inserta en los cromosomas en una nueva ubicación. Por otro lado, la transcripción inversa: durante la expresión génica, el ARNm se copia hacia atrás para dar una secuencia de ADN que se inserta en el genoma.

EXTINCION DE UN GEN Y NACIMIENTO DE UN PSEUDOGEN

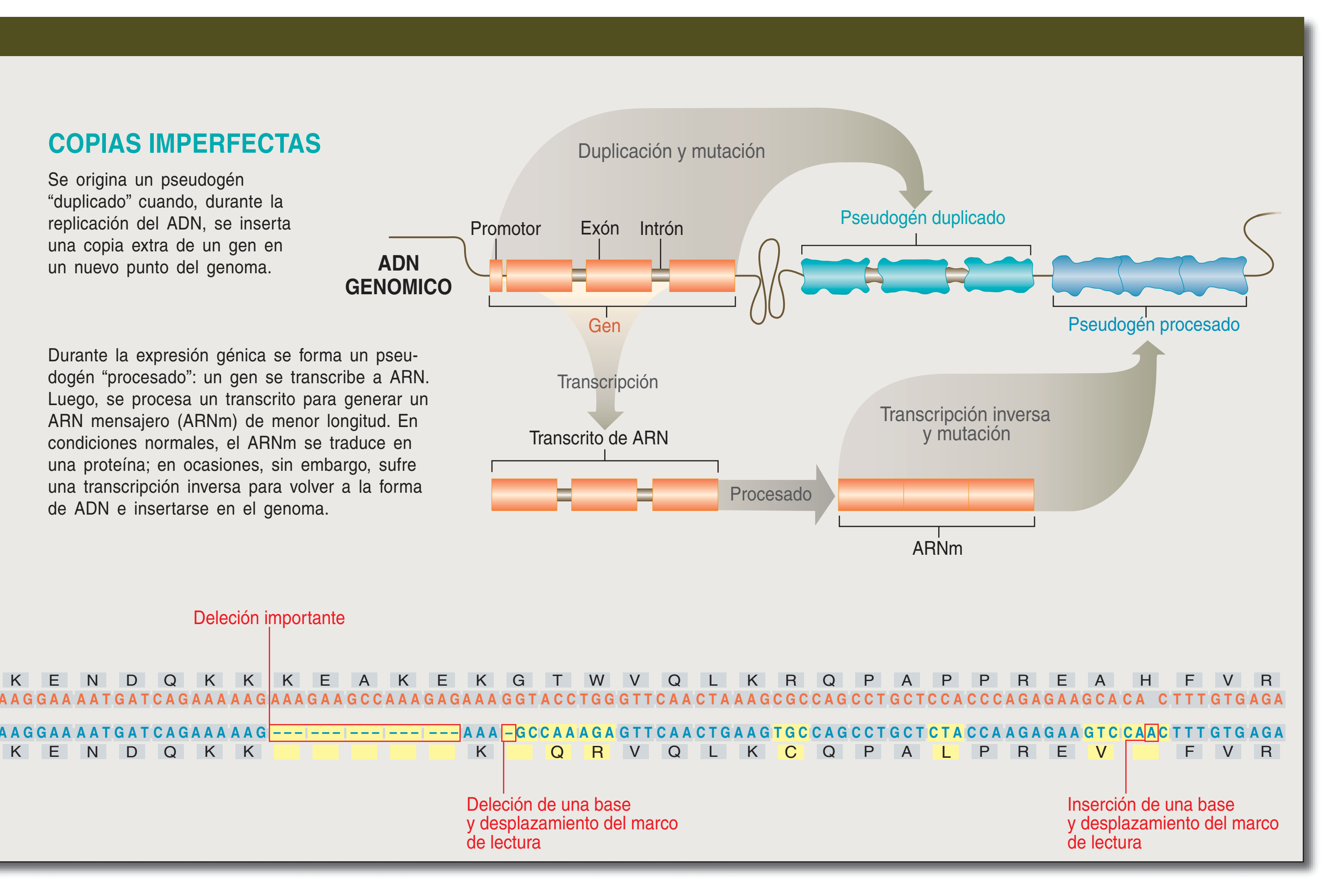
Dos son los procesos de duplicación génica que se encargan del crecimiento y diversificación de los genomas en el transcurso de la evolución. Si una copia sufre alteraciones que arruinan su función génica, se convierte en pseudogén (*derecha*). Las mutaciones que "matan" un gen (*debajo*) van desde grandes deleciones (la pérdida de la región promotor que señala el comienzo de una secuencia génica, por ejemplo) hasta cambios particulares en la secuencia del ADN que estropean el significado de los segmentos del gen que codifican la proteína (exones).

MUERTE DE UN GEN

Los genes mueren y se convierten en pseudogenes cuando las mutaciones generadas durante el proceso de copia del gen o acumuladas a lo largo del tiempo terminan por incapacitarlo para la síntesis de proteína. La maquinaria celular lee el alfabeto de bases nucleotídicas del ADN (A, C, G, T) en grupos de tres, o codones, que se corresponden con los aminoácidos que forman la secuencia de una proteína, o bien suponen las señales de "paro", que indican el final de un gen. Las propias mutaciones que afectan a una sola base en los codones alteran el significado aminoacídico. Las deleciones o inserciones de bases repercuten en los codones vecinos, pues provocan un desplazamiento del marco de lectura de la maquinaria celular. El alineamiento que se muestra aquí de una secuencia parcial de un gen humano (*RPL21*) con una de sus copias pseudogén (ΨRPL21), así como el aminoácido (AA) correspondiente a cada codón, ilustra algunas de las mutaciones incapacitantes que suelen encontrarse en los pseudogenes.

Resumen/El pseudogenoma

- Los pseudogenes constituyen restos moleculares de genes dañados que han perdido la funcionalidad por culpa de una alteración letal de su estructura.
- En su mayoría, los pseudogenes corresponden a copias dañadas de genes funcionales; vienen a ser fósiles génicos que arrojan luz sobre la evolución y la dinámica del genoma.
- La identificación de pseudogenes requiere un rastreo exhaustivo de datos para localizar secuencias que guarden semejanza con genes y un análisis para establecer si se hallan o no activos.
- Pruebas recientes de actividad entre los pseudogenes, así como de su potencial "resurrección", sugieren que algunos de ellos no están completamente "muertos".



COPIAS IMPERFECTAS

Se origina un pseudogén "duplicado" cuando, durante la replicación del ADN, se inserta una copia extra de un gen en un nuevo punto del genoma.

Durante la expresión génica se forma un pseudogén "procesado": un gen se transcribe a ARN. Luego, se procesa un transcrito para generar un ARN mensajero (ARNm) de menor longitud. En condiciones normales, el ARNm se traduce en una proteína; en ocasiones, sin embargo, sufre una transcripción inversa para volver a la forma de ADN e insertarse en el genoma.

LUCY READING-IKKANDA

Este fenómeno, la retrotransposición, se debe a la actividad de otro actor génico transposable, el elemento nuclear interpuesto, o LINE ("long interspersed nuclear element"), que opera como un virus genómico. Los LINE llevan su propia maquinaria productora de copias de su ADN para que se injerten en el genoma. Hay en la vecindad transcritos de ARNm que, cuando los LINE se encuentran activos, se absorben y someten a un proceso de retrotransposición.

La duplicación y la retrotransposición constituyen fuerzas de primer orden en la remodelación que sufren los genomas en el transcurso de la evolución. Contribuyen a la generación de nuevas variantes en los organismos. A través de ambos medios los genomas crecen y se diversifican, pues un gran número de los genes replicados permanecen activos. No obstante, si la copia del gen contiene letras en su secuencia lesivas, o le faltan piezas del original (el promotor, por ejemplo), se convertirá en un pseudogén. Los que se forman a partir de la duplicación de un gen entero se distinguen porque contienen intrones y exones. Los pseudogenes producidos a partir de ARNm maduro carecen de intrones; se consideran pseudogenes procesados.

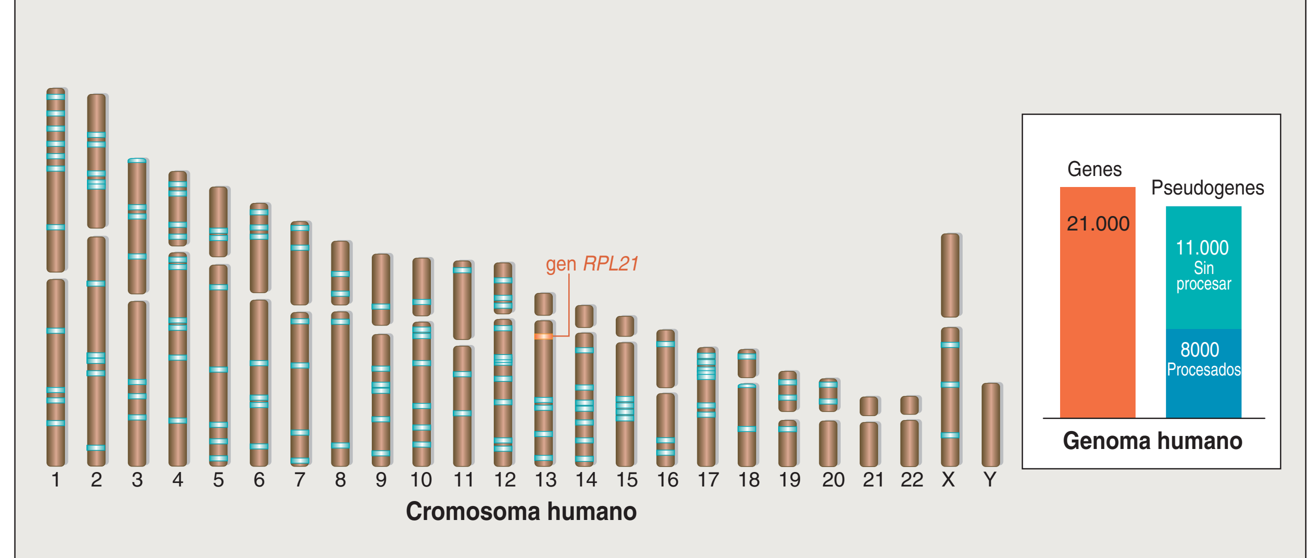
Aunque la distribución de la mayoría de pseudogenes a lo largo de los cromosomas humanos parece aleatoria, hay ciertos tipos de genes con mayor propensión a generar pseudogenes. En genética se clasifican los genes funcionales en familias, según la semejanza en secuencia y función. Sólo alrededor de una cuarta parte de estos grupos familiares están asociados con un pseudogén; pero algunas familias han producido un número de copias extraordinario. Por ejemplo, la familia de 80 genes humanos que producen proteínas ribosómicas ha dado lugar a unos 2000 pseudogenes procesados, aproximadamente la décima parte del total identificado en el genoma. *RPL21*, el gen de una proteína ribosómica, ha engendrado más de 140 copias pseudogénicas.

Con toda probabilidad, esta disparidad deriva de los distintos niveles de actividad de los genes. Los responsables de las tareas celulares de mantenimiento básicas (los genes de la familia de las proteínas ribosómicas, por ejemplo) se expresan de forma abundante; ello aumenta las oportunidades de crear pseudogenes procesados.

Los pseudogenes vienen apareciendo en nuestros genomas desde hace largo tiempo. Algunos constituyen reliquias de genes eliminados en el transcurso de la evolución, de los que no existe ya versión funcional. Otros son copias de un gen que ha seguido evolucionando, de modo que su secuencia puede reflejar una versión más vieja del parental. Las regiones intergénicas vendrían a ser, pues, vastos estratos fósiles que ofrecen un registro silencioso de acontecimientos evolutivos remotos.

Historias familiares

Los principios de la selección natural parecen operar también sobre los genes individuales. Lo hacen mediante la restricción de las mutaciones que se producen en los genes funcionales:



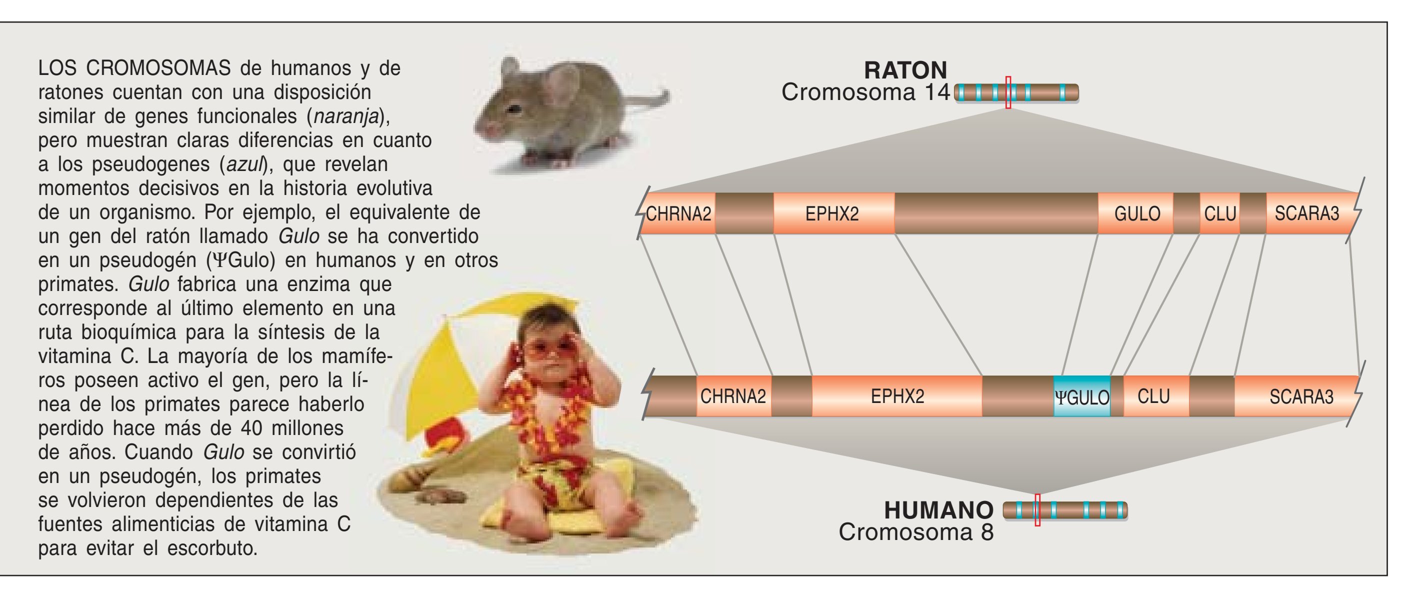
LOS PSEUDOGENES (*azul*) descendientes del *RPL21*, gen de la proteína ribosómica (*naranja*), se hallan repartidos por el paisaje cromosómico humano. La distribución general de los pseudogenes en el genoma humano parece ser completamente aleatoria, aunque algunas regiones genómicas tienden a contener mayor concentración de pseudogenes. Dichas regiones pueden equipararse con ciertos entornos geoquímicos que conservan mejor los fósiles. La identificación de genes y pseudogenes no cesa. Hasta la fecha se han identificado más de 19.000 pseudogenes en el genoma humano, cifra ligeramente inferior a los 21.000 genes humanos (*inserto*). Unos 8000 de nuestros pseudogenes son de tipo procesado; el resto incluye pseudogenes duplicados y otras subcategorías sin procesar.

las mutaciones génicas que mejoran la viabilidad de un organismo tienden a conservarse, mientras que se descarta un cambio de secuencia que dañe la función del gen.

Los pseudogenes, una vez incorporados a "la chatarra genómica", quedan exentos de tal presión selectiva; son libres de acumular mutaciones sin cuento, incluidas las alteraciones que resultarían deletéreas para los genes normales. Los cambios en los pseudogenes constituyen una suerte de reloj molecular que se aplica al estudio de la dinámica y la evolución del genoma. El rastreo evolutivo de genes y pseudogenes posibilita el descubrimiento de origen y muerte de genes, a imagen del estudio de los fósiles, que permite acotar la aparición y extinción de especies.

Nuestro grupo ha examinado pseudogenes en los genomas de numerosas formas de vida: bacterias, levaduras, vermes, moscas y ratones. Su predominio en un amplio rango de seres es sorprendente. El número de pseudogenes en los distintos genomas presenta una variabilidad significativa, mayor que la de los propios genes. Con todo, una cifra difícil de predecir, pues no guarda proporción exacta ni con el tamaño del genoma ni con el número total de genes. Ello no obsta para que las comparaciones de los pseudogenes en genomas emparentados aporten información de interés sobre la historia de genes específicos y el funcionamiento general de la evolución molecular.

Una de las mayores familias de genes de mamíferos conocida incluye más de 1000 genes que codifican receptores olfatorios, las proteínas de membrana responsables del sentido del olfato. Un análisis detallado de los genes y pseudogenes de los receptores olfatorios llevado a cabo



LOS CROMOSOMAS de humanos y de ratones cuentan con una disposición similar de genes funcionales (*naranja*), pero muestran claras diferencias en cuanto a los pseudogenes (*azul*), que revelan momentos decisivos en la historia evolutiva de un organismo. Por ejemplo, el equivalente de un gen del ratón llamado *Gulo* se ha convertido en un pseudogén (ΨGulo) en humanos y en otros primates. *Gulo* fabrica una enzima que corresponde al último elemento en una ruta bioquímica para la síntesis de la vitamina C. La mayoría de los mamíferos poseen activo el gen, pero la línea de los primates parece haberlo perdido hace más de 40 millones de años. Cuando *Gulo* se convirtió en un pseudogén, los primates se volvieron dependientes de las fuentes alimenticias de vitamina C para evitar el escorbuto.

LUCY READING-IKKANDA (*ilustración*); DIGITAL VISION/GETTY IMAGES (*ratón*); PAUL BARTON *zefa/Corbis* (*niño*)

por Doron Lancet y Yoav Gilad, del Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot, muestra que los humanos han perdido genes de receptores olfatorios durante la evolución; y no pocos: en la actualidad contamos con menos de 500. En cambio, hay versiones de unos 300 pseudogenes de receptores olfatorios humanos que siguen siendo genes funcionales en los genomas de ratas y ratones.

No nos sorprenderá tal discrepancia si tenemos en cuenta que, para su supervivencia, la mayoría de los animales dependen del sentido del olfato más que los humanos. Los humanos cuentan con un número mayor de pseudogenes de receptores olfatorios que los chimpancés; ello indica que nosotros perdimos muchos de esos genes funcionales tras separarnos de la línea de los primates. Sin embargo, los primates tienen una proporción mayor de pseudogenes de receptores olfatorios (del 30 al 40 por ciento) que los roedores o los perros, lo cual sugiere que algo debió influir en el linaje de los primates para que éstos se las arreglaran con un sentido del olfato mermado.

Mediante el estudio de primates y monos, Lancet y sus colaboradores observaron que la mayor pérdida de genes de receptores olfatorios —es decir, el mayor incremento en pseudogenes de receptores ofatorios— ocurrió en los linajes de primates y monos, que desarrollaron la visión cromática en tres longitudes de onda de luz visible. Quizá tuvo lugar un trueque sensorial a lo largo del tiempo en la línea de los primates, cuando una visión más refinada hizo que un sentido agudo del olfato resultase menos crítico.

A menudo, los genes implicados en la respuesta de un organismo a su medio están sujetos a duplicación y diversificación incesantes; con el tiempo, ello conduce a familias de genes amplias, como ocurre con el repertorio de los receptores olfatorios. Muchas copias de pseudogenes "nacidos muertos" constituyen un subproducto inmediato de este proceso. Pero la muerte posterior de duplicados adicionales, que da lugar a nuevos pseudogenes, está también con frecuencia conectada con cambios en el entorno o las circunstancias de un organismo. Por tanto, las diferencias entre los pseudogenes de animales distintos ofrecen pistas acerca de su diferente historia biológica; una información que no se aprehende con igual facilidad mediante la comparación de genes funcionales, ceñidos al cumplimiento de su misión.

Un análisis del genoma del ratón ha mostrado que el 99 por ciento de los genes humanos hallan una versión correspondiente en el múrido. Aunque la línea humana y la del ratón se separaron hace unos 75 millones de años, casi todo el genoma humano se alinea con regiones equivalentes, denominadas bloques sinténicos, en el genoma del ratón. Sin embargo, tal semejanza en genes funcionales y estructura general del genoma no empece que sólo una pequeña fracción de los pseudogenes humanos conocidos presente correspondencia en el ratón.

Es más, algunas de las familias de genes que dan lugar a pseudogenes difieren entre ratón y humanos. Y divergen con nitidez. Si usamos la velocidad de degeneración de secuencia relativa a los genes parentales para determinar la edad de los pseudogenes, resulta claro que muchos pseudogenes presentes en el genoma humano y en el del ratón surgieron en momentos distintos. De lo que se infiere que existieron acontecimientos dispares que provocaron estallidos independientes de retrotransposición, causantes de pseudogenes en cada una de las líneas.

Exploración y cribado

Los estudios centrados en los pseudogenes acaban de empezar. Antaño, los genes fósiles se reputaban un estorbo. Los primeros intentos de catalogación de los pseudogenes recibieron un impulso ante la necesidad de distinguir los pseudogenes de los genes verdaderos cuando se escribían las secuencias genómicas. Pero la identificación de pseudogenes no resulta tan directa como la de genes. La identificación de genes se realiza, con un éxito moderado, mediante la exploración de secuencias de ADN a cargo de algoritmos buscadores de patrones. El reconocimiento de pseudogenes, en cambio, depende de su parecido con los genes y su falta de función. Los ordenadores detectan tal semejanza mediante el alineamiento exhaustivo de fragmentos de ADN intergénico frente a todos los posibles



genes parentales. La determinación de la falta de funcionalidad de un pseudogén sospechoso entraña mayor dificultad.

La muerte de un organismo se produce por causas diversas. Son varias también las mutaciones deletéreas que afectan a algún paso de la síntesis proteica y, por tanto, conllevan la inutilización de un gen copiado, que se convierte en un pseudogén. Pero la propia secuencia ofrece pistas acerca de si una mutación resulta debilitante. Podemos fijarnos en señales prematuras de "paro", así como en inserciones o deleciones de nucleótidos que desplazan el marco de lectura de la maquinaria celular encargada de descodificar la información génica para fabricar una proteína. Los verdaderos genes no toleran tales incapacitaciones. Constituyen, por tanto, manifestaciones típicas de los pseudogenes.

De modo más sutil, la teoría neutralista de la evolución, esbozada por el biomatemático Motoo Kimura en los años sesenta del siglo pasado, sostiene que las secuencias de ADN no funcionales cambian libremente, sin las limitaciones de la selección natural. Así, las mutaciones en nucleótidos individuales se dividen en dos tipos: las que preservarían la secuencia aminoacídica de la proteína codificada por un gen, o cambios sinónimos, y los cambios no sinónimos, que alterarían el significado de la secuencia. Puesto que la alteración de la secuencia de aminoácidos suprime la función proteica, un gen bajo presión selectiva tenderá a alojar mutaciones sinónimas; pero una secuencia de ADN no funcional no se hallará sujeta a esa restricción.

Comparaciones de pseudogenes llevadas a cabo entre genomas han puesto de manifiesto un fenóme-

no sorprendente. A saber, algunos pseudogenes parecen persistir en un estado de conservación mucho más de lo que cabría esperar en el caso de que su secuencia hubiese sufrido una deriva neutralista. Ello hace pensar en la acción de cierta restricción evolutiva, lo que implica que estos pseudogenes podrían desempeñar alguna función. Para averiguar si los pseudogenes se hallan activos, comprobaremos si se transcriben en ARN. Los experimentos que Thomas Gingeras, de Affymetrix, y Michael Zinder, de la Universidad de Yale, acaban de realizar han demostrado que se transcribe una fracción importante de las regiones intergénicas en el genoma humano. De hecho, más de la mitad de las secuencias que se transcriben con mayor frecuencia se localizan en regiones que no se corresponden con los genes conocidos. Es más, varias de esas áreas intergénicas transcripcionalmente activas se solapan con pseudogenes, lo que sugiere que quizás en algunos pseudogenes queda aún vida.

Nuestro grupo de investigación forma parte de un consorcio de laboratorios que se ha propuesto ahondar en la materia oscura del genoma. Nos encontramos en la fase piloto de un proyecto para crear una "enciclopedia de elementos del ADN" (ENCODE), cuyo objetivo último es la identificación de las partes del genoma y su función. Estudios previos, junto con datos preliminares de ENCODE, indican que al menos la décima parte de los pseudogenes humanos son activos desde la óptica de la transcripción. El saber que tantos pseudogenes se transcriben no nos aporta ninguna información sobre su función. Si a ello sumamos que algunos pseudogenes se encuentran mejor conservados que las secuencias intergénicas en general, tendremos que reconocer aquí un desafío a la visión clásica que considera entidades "muertas" a los pseudogenes.

Quizá los pseudogenes desempeñen alguna función en la regulación de la actividad génica. En los organismos superiores hay genes que no codifican una proteína, sino que sus transcritos de ARN operan en el control de otros genes. Estas moléculas de ARN reguladoras activan o reprimen a otro gen, cuando no se interponen en la traducción del transcrito de ARNm de ese gen en una proteína. Y se han descrito al menos dos ejemplos de pseudogenes que operan de forma similar.

El primero lo publicó en 1999 el equipo de Michael O'Shea, de la Universidad de Sussex. Descubrieron que en las neuronas de un caracol común de los estanques, el gen de la enzima óxido nítrico sintasa (*NOS*) y el pseudogén correspondiente se transcriben a ARN, pero el transcrito de ARN del pseudogén inhibía la síntesis de proteína a partir del transcrito del gen normal.

En 2003, Shinji Hirotsune, del Centro de Investigaciones Médicas de Saitama, halló un nexo de unión entre deformidades en un grupo de crías de ratones de laboratorio y la alteración de un pseudogén. El silencio de *Makorin1*, un gen regulador, había alterado de forma negativa el desarrollo de los múridos. Hirotsune no lo había manipulado; de forma accidental, había destruido el pseudogén Makorin1, lo cual afectaba a la función de *Makorin1*.

Pese al carácter provisional de los resultados, se han identificado un par de docenas de pseudogenes que muestran algún tipo de actividad; a menudo operan sólo en determinadas células de un organismo. Puesto que la secuencia de muchos pseudogenes guarda una estrecha semejanza con la de su gen parental, parece obligado suponer que los pseudogenes NOS y Makorin1 no constituyen sólo casos aislados. Con todo, es difícil imaginar que estos dos pseudogenes desempeñaran en su origen las funciones que realizan ahora. Su actividad debe ser resultado de un proceso de selección que conserva los accidentes afortunados o de la naturaleza, que haya encontrado un modo de reaprovechar los fragmentos génicos rotos, convirtiéndolos en elementos reguladores.

Protogenes

Acaba de abrirse una era excitante de la paleontología molecular. Apenas hemos arañado la superficie de los estratos de los pseudogenes. En

LOS CILIOS que se proyectan desde el epitelio olfatorio humano (*izquierda*) están sembrados de receptores invisibles para moléculas odoríferas, que detectan los olores. En mamíferos, se ha identificado una familia de más de 1000 genes que codifican esos receptores olfatorios; las especies individuales, sin embargo, presentan una gran variabilidad en cuanto a su número total de genes para los receptores olfatorios y en el porcentaje del repertorio de los mismos que se han convertido en pseudogenes. La pseudogenización a gran escala se observa con mayor frecuencia entre genes que, como ocurre en la familia de los receptores olfatorios, son responsables de respuestas al medio. Los pseudogenes de un organismo podrían encerrar los cambios producidos en el transcurso de la historia evolutiva de la especie en cuestión.

RICHARD COSTANZO *Virginia Commonwealth University (micrografía)*; COLOREADO POR EMILY HARRISON;LUCY READING-IKKANDA *(ilustración)*



cuanto perforemos los estratos, crecerá el número de pseudogenes identificados y, con ellos, las sorpresas. La identificación a gran escala de pseudogenes constituye un proceso dinámico de extracción de datos. Las técnicas actuales se basan en la comparación de secuencias con genes caracterizados. Identifican pseudogenes "jóvenes"; las secuencias viejas y degeneradas, en cambio, escapan a la detección. Conforme la secuenciación del genoma humano se refine y actualice, mejorará también la caracterización de los pseudogenes.

Los indicios que sugieren que no todos los pseudogenes yacen extintos despiertan sumo interés. Por no hablar de las pruebas acerca de la posibilidad de "resurrección" de los pseudogenes: genes muertos que tornan a la vida y fabrican un producto proteico funcional. Por las comparaciones entre secuencias se supo que un gen de la vaca para una enzima ribonucleasa había sido un pseudogén durante buena parte de su historia, reactivado en un período evolutivo reciente. También se han detectado ligeras diferencias en los complementos de pseudogenes de ciertas personas; así, unos pseudogenes de receptores olfatorios son pseudogenes en la mayoría de la gente, mientras que en algunos individuos son genes cabales y funcionales. Se originarían tales anomalías si ciertas mutaciones aleatorias revertiesen la discapacidad que originalmente generó el pseudogén. ¿Podrían ser éstas responsables de la variabilidad individual para la olfacción? Tal vez, aunque es demasiado pronto para hacer conjeturas sobre el alcance y significado de esta fuente inesperada de variación génica entre los humanos.

De acuerdo con nuestros ensayos con levaduras, los pseudogenes de cierta proteína de la superficie celular podrían reactivarse cuando el organismo se enfrenta a un medio nuevo estresante. Los pseudogenes pueden, pues, considerarse no sólo genes muertos (lo que nos abre una ventana prodigiosa a nuestro pasado), sino también genes potenciales, nonatos: un recurso escondido en nuestro armario génico para sacarlo cuando las circunstancias lo requieran, cuya posible función en nuestro genoma presente y futuro está empezando a revelarse.

Los autores

Mark Gerstein y **Deyou Zheng** trabajan en la Universidad de Yale, donde Gerstein es profesor A. L. Williams de informática biomédica y codirector del Programa de Yale en biología computacional y bioinformática. Zheng, tras doctorarse en la Universidad de Rutgers, se integró en el grupo de Gerstein en 2003 para investigar la actividad y la evolución de los pseudogenes.

Bibliografía complementaria

EL AGUA Y LAS MOLÉCULAS DE LA VIDA. Mark Gerstein y Michael Levitt en *Investigación y Ciencia*; enero 1999.

HUMAN SPECIFIC LOSS OF OLFACTORY RECEPTOR GENES. Yoav Gilad et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 100, n.º 6, págs. 3324-3327; 18 de marzo, 2003.

PPSEUDOGENES: ARE THEY "JUNK" OR FUNCTIONAL DNA? Evgeniy S. Balakirev y Francisco J. Ayala en *Annual Review of Genetics*, vol. 37, págs. 123-151; diciembre 2003.

LARGE-SCALE ANALYSIS OF PSEUDOGENES IN THE HUMAN GENOME. Zhaolei Zhang y Mark Gerstein en *Current Opinion in Genetics & Development*, vol. 14, n.º 4, págs. 328-335; agosto 2004.

El ciervo ibérico

Cervus elaphus hispanicus en Sierra Morena

El ciervo común (*Cervus elaphus*) pertenece a la familia *Cervidae*, integrada por ungulados artiodáctilos rumiantes en los que converge una serie de características morfológicas comunes: presencia de doble fosa lacrimal, algunos huesos del tarso fusionados, ausencia de incisivos superiores, privación de vesícula biliar y renovación anual de la cornamenta. A propósito del último rasgo hemos de señalar, sin embargo, que sólo lo portan los machos, con la excepción del reno (*Ranginfer tarandus*) y el alce (*Alces alces*), especies en las que las hembras presentan cuernas, o la del ciervo acuático (*Hydropotes* sp.), de cabeza mocha lo mismo los machos que las hembras.

La familia *Cervidae* se incluye en el infraorden *Pecora* del suborden *Rumiantes*. Junto con las familias *Moschidae* y *Antilocapridae* forman la superfamilia *Cervoidea*. Este grupo de mamíferos goza de una larga trayectoria filogenética cuyos inicios se remontan a finales del Eoceno (era que terminó hace 34 millones de años). Por entonces, los primeros rumiantes empezaron a constituir un grupo muy diverso y complejo. En el Oligoceno (entre hace 34 y 23 millones de años) empiezan a distinguirse animales parecidos a los ciervos, a partir de ancestros similares a los actuales *Tragulidae* (pequeña familia de artiodáctilos asiáticos y africanos), pero los primeros cérvidos genuinos no aparecen hasta principios de la serie siguiente, el Mioceno, en Eurasia.

Los cérvidos primitivos eran de talla pequeña o mediana. Los machos carecían de cuernas y tenían unos caninos largos, semejantes al actual ciervo almizclero (*Moschus* sp.). Los primeros cérvidos con cuernas caducas aparecieron en el Mioceno medio; recordaban al muntjac (*Dicrocerus* sp.). De finales del Mioceno y principios del Plioceno (hace algo más de cinco millones de años) son los ancestros de los géneros *Cervus* y *Axis*. En ese mismo intervalo se fecha el desarrollo de la configuración progresiva de una cornamenta cada vez más compleja, así como el manifiesto dimorfismo sexual de la mayoría de los ciervos actuales.

Los cérvidos actuales son el resultado de una evolución intensa y acelerada del Pleistoceno, iniciada hace dos millones de años y que perdura hasta hace 11.500. Se deduce de la amplia diversidad de registros fósiles, lo mismo de antepasados de los ciervos actuales que de los extintos (*Cervalces* y *Megaloceros giganticus*). A finales del Pleistoceno, el ciervo era en Europa mucho mayor que en el postpleistoceno y que en la actualidad. Según parece, alcanzó su tamaño máximo durante las últimas glaciaciones, para ir disminuyendo desde entonces.

Cervus elaphus muestra ahora la distribución más amplia de cuantas especies integran la familia *Cervidae*. En el siglo XIX se introdujo en Nueva Zelanda, Argentina y Chile y en algunos estados de América del Norte. Desde 1907 se encuentra en Australia. En Europa se distribuye por toda la zona centro, desde Francia hasta Polonia; ocupa zonas favorables del este, llegando a Rumania y Bulgaria, aunque parece estar ausente de Albania. La localización más oriental se encuentra en Ucrania y áreas rusas al este del mar Rojo; llega incluso al Turkestán y el Tibet. La localización más septentrional se halla en Noruega; aparece también en Dinamarca y algunas zonas de Suecia, pero no hay ciervos ni en Finlandia ni en Islandia. Común en Gran Bretaña e Irlanda, incluida la isla escocesa de Rum. Córcega y Cerdeña son las únicas



1. El ciervo ibérico (*Cervus elaphus hispanicus*) es la subespecie que mejor rentabiliza la vegetación de los ecosistemas mediterráneos de la península Ibérica y la que mejor resiste las duras condiciones climáticas del verano en nuestras latitudes.

FOTOGRAFIAS REALIZADAS POR JOSE LUIS FERNANDEZ CARNERO

islas del Mediterráneo en las que está presente. El área de ocupación más meridional abarca la península Ibérica, Marruecos y Argelia.

Tan amplia distribución va acompañada de una notable riqueza de subespecies, con fenotipos distintos debidos a su adaptación a diferentes hábitats y ecotipos y a las diversas condiciones ambientales. Tan amplia distribución, sin embargo, no siempre coincide con que sea la especie más abundante ya que, en muchas zonas de los países mencionados incluso escasea. En Europa el cérvido más abundante es el corzo (*Capreolus capreolus*). No así en España.

La subespecie ibérica (*Cervus elaphus hispanicus*), se halla perfectamente adaptada a las condiciones climáticas y ambientales de los ecosistemas mediterráneos. No hay otra subespecie que rentabilice mejor su vegetación esclerófila y resista las duras condiciones de xericidad o sequía estival. El ciervo ibérico, que se extiende por casi toda la península Ibérica, ha sido introducido en el norte de Africa, concretamente en Marruecos, donde puede haber interaccionado con la subespecie africana, el escaso *Cervus elaphus barbarus*.

El ciervo ibérico difiere de sus parientes europeos en diversos rasgos: carece de melena en el cuello, posee un tono más gris y menos rojizo, presenta franjas negras menos marcadas en la parte anal y es una de las subespecies europeas de menor tamaño. Este último carácter suele asociarse a la baja latitud en la que se encuentra, que le hace enfrentarse a temperaturas más elevadas; en el resto de Europa el tamaño de los ciervos es mayor cuanto más baja es la temperatura invernal y va decreciendo de este a oeste. En Alemania los ciervos adultos machos pueden pesar 200 kg, en Bélgica y Francia 180 kg y en Escocia 150 kg, que es el peso más próximo al del ciervo ibérico; la subespecie del norte de Africa es aún más pequeña.

La abundancia de restos fósiles y la frecuencia con la que aparece esta especie en los yacimientos arqueológicos nos indica que ocupaba gran parte de la península Ibérica. Su área de distribución se restringe drásticamente a finales del siglo XIX y principios del XX con el aumento demográfico humano y los cambios de uso y aprovechamiento de la tierra, llegando incluso a desaparecer de muchas zonas de España y en todo Portugal. En 1914, el naturalista Angel Cabrera limita su área de distribución al sudoeste peninsular (Marismas, Sierra Norte, Sierra Morena y Montes de Toledo), con dos excepciones artificiales: el monte del Pardo en Madrid y el de Río Frío en Segovia. A principios del pasado siglo el ciervo sólo era todavía bastante común en Extremadura, Montes de Toledo y Sierra Morena.



2. La subespecie ibérica es de menor tamaño, carece de melena en el cuello, posee un tono más grisáceo y presenta franjas negras menos marcadas en la parte anal.

Sierra Morena Oriental ha constituido uno de los refugios naturales para el ciervo en España. De allí procedían muchos de los ejemplares utilizados en las repoblaciones oficiales y particulares realizadas desde los años cincuenta en nuestro país. Ha sido históricamente una región poco conocida, poco visitada, casi deshabitada y escasamente explotada. La presencia secular del ciervo en estas sierras, la pobreza e inaccesibilidad de la zona y la existencia de extensos latifundios han fomentado una economía de tipo marginal basada en usos tradicionales, donde la gran superficie forestal se dedicó principalmente a la caza, mientras que la ganadería y la agricultura escasearon.

Desde las crónicas medievales de los reyes de Castilla hasta *Las monterías en Sierra Morena a mediados del siglo XIX*, de Pedro de Morales Prieto (1904), o "*La España Inexplorada*" de los naturalistas británicos Chapman y Buck (1910), la historia nos revela que los ciervos han sido, a lo largo de los siglos, la especie cinegética más apreciada en la Península.

Hoy en día, la parte de Sierra Morena que se encuentra en la provincia de Jaén, con unas 142 fincas de caza mayor en una superficie aproximada de 2000 km^2, es un área de importancia ecológica; abarca zonas que cuentan todavía con un alto grado de conservación ambiental y mantienen núcleos de bosque mediterráneo en perfecto estado. Allí coexisten especies en peligro de extinción: águila imperial ibérica (*Aquila adalberti*), cigüeña negra (*Ciconia nigra*) y lince ibérico (*Lynx pardinus*). Su interés naturalista quedó sancionado a finales de los años ochenta con la creación de los Parques Naturales de Despeñaperros y Andújar.

Su permanencia constituye un ejemplo de cómo la explotación cinegética del ciervo de una manera tradicional y poco intensiva, es decir, con bajas densidades de animales y en grandes fincas con poca intervención sobre el terreno y los hábitats, ha permitido una conservación del medio mucho mejor que en otras zonas donde predominaron la agricultura, la ganadería o el uso forestal. Apoyados en su caso y en otros similares, algunos aducen que la caza es



3. Sierra Morena Oriental ha constituido uno de los refugios naturales del ciervo ibérico en España, actualmente es un enclave de importancia ecológica cuyo mantenimiento y el de las especies en peligro que aún alberga está condicionado por un correcto manejo de las poblaciones de ciervo.

FOTOGRAFIA REALIZADA POR CONCEPCION AZORIT CASAS

la actividad económica preferible en ese tipo de áreas rurales, por ser la más compatible con la conservación de los ecosistemas.

A partir de los años cincuenta es cuando se empieza a promocionar la explotación cinegética con repoblaciones oficiales de ciervos en 17 provincias de la península. En 1952 se crea el coto nacional de caza de Cazorla-Segura, de donde también habían desaparecido el ciervo y otros ungulados como el corzo, y a finales de los años sesenta y principios de los setenta se crea el resto de las reservas y cotos nacionales de caza, entre ellas los de Lugar Nuevo y Selladores-Contadero, también en la provincia de Jaén. Se extiende así la creación de cotos de caza mayor y el vallado de los mismos, con el fin de favorecer la distribución y mantenimiento del ciervo y otras especies cinegéticas, satisfacer una demanda social de actividades cinegéticas y rentabilizar de ese modo áreas rurales en general poco productivas.

Estas actuaciones tuvieron tanto éxito, que hoy la gran abundancia del ciervo alcanza cotas que sorprenden cuando se analizan con cierto detenimiento o cuando se comparan con datos procedentes de otras latitudes. En Sierra Morena, las altas densidades de ciervos permiten que el número de animales cazados anualmente alcance los valores más altos registrados en el mundo.

Desde 1992 hasta 2002 se cazaron en las fincas jienenses de Sierra Morena más de 73.000 ciervos de ambos sexos; por unidad de superficie, se cazó una media de 4,7 ciervos/km^2. Esta cifra fue superada en algunas de las temporadas de caza, como la de 1994/95 o 1995/96, en las que se alcanzaron densidades medias de 6,7 ciervos/km^2, e incluso en algunas fincas se llegaron a cazar hasta 10,2 ciervos/km^2. Tan altas tasas de extracción son un reflejo de las elevadas densidades de ciervos que existen en las fincas de caza mayor, donde encontramos del orden de 45-50 ciervos/km^2; en ciertas zonas se llega a superar los 60 ciervos por cada 100 hectáreas. Lo que se caza en algunos de estos cotos supera las densidades totales existentes en otras zonas del mundo, donde poblaciones de 10-15 animales por cada 100 hectáreas ya se consideran demasiado abundantes.

Si bien es cierto que los ecosistemas mediterráneos presentan una mayor capacidad de acogida que otros ambientes más septentrionales, estas densidades parecen estar al límite, o sobrepasando ya, la capacidad de carga del medio, es decir, lo que el terreno y la vegetación pueden mantener. Puede considerarse que en algunas zonas de Sierra Morena las poblaciones de ciervos están en condiciones de sobreabundancia.

La presencia de poblaciones de grandes herbívoros en densidades elevadas es un fenómeno cada vez más frecuente en todo el mundo. Cuando las densidades están por encima de la carga óptima, es decir, por encima de lo que el hábitat puede mantener, se observa en los ciervos un descenso de la fertilidad, un retraso en la época de paridera, un aumento de mortalidad en las crías y una disminución del desarrollo de los trofeos. En estas condiciones disminuye la condición corporal de los ciervos y, por tanto, su calidad y productividad cinegéticas. Por un exceso de ramoneo se produce, además, una presión excesiva sobre la vegetación, en la que se provocan graves alteraciones y cuya regeneración se compromete; este último aspecto afecta no sólo al ciervo, sino también a otras especies, entre ellas algunas muy exclusivas y endémicas cuya permanencia está condicionada por el mantenimiento del bosque mediterráneo.

Los efectos negativos más dramáticos de las elevadas densidades quedaron de manifiesto en Sierra Morena durante los años 1994 y 1995, los últimos de un período plurianual de sequía en donde la capacidad de carga del medio se sobrepasó con creces. No bastó con reducir la densidad de ciervos mediante monterías de gestión o cazas selectivas. La condición corporal de los ciervos estaba bajo mínimos, los pesos de las canales comercializadas fueron muy bajos, aumentó la prevalencia de ciertas enfermedades e incluso se produjo gran cantidad de muertes, tanto de crías como de adultos; la vegetación sufrió grandes daños. Las altas densidades, la falta de previsión y las duras condiciones climáticas anularon la capacidad amortiguadora del ecosistema de las condiciones adversas durante el verano.

Juan Carranza, de la Universidad de Extremadura, y otros han llamado la atención sobre la tendencia actual

de adaptar las prácticas de la ganadería extensiva al manejo de los hábitats de cría de especies cinegéticas. La tradición ganadera convierte los ecosistemas mediterráneos en dehesas. La transformación del bosque mediterráneo en formaciones adehesadas aumenta la productividad por unidad de superficie, pero las dehesas no siempre aportan al ciervo el sustento necesario durante la época más desfavorable, el verano.

En áreas más septentrionales, la hierba permanece disponible a lo largo del año, salvo en invierno. Pero en el área mediterránea, los pastos son primaverales. Siempre que los ciervos tengan acceso al pastizal, su alimentación preferida será herbácea. A finales de primavera y en verano, épocas del año en que coinciden procesos fisiológicos de alto requerimiento energético con la escasez o incluso ausencia de pasto verde, los ciervos se convierten en ramoneadores; seleccionan especies arbóreas y arbustivas, y sus frutos, para poder mantener unos niveles nutricionales aceptables.

Así, mientras que la dieta de primavera está constituida fundamentalmente por herbáceas, en verano y otoño aumenta la proporción de especies arbustivas y frutos. En verano se alimentan de jaras (*Cistus* sp.) y en otoño e invierno de *Quercus* sp. El ciervo ibérico se comporta entonces como un verdadero ramoneador. Se ha comprobado que en el sur de España, conforme decrecen la disponibilidad y calidad de la hierba, aumenta la proporción de ramoneo en la dieta hasta llegar incluso a un 80 %. El consumo de especies arbustivas y arbóreas durante el invierno alcanza un 95,7 %, siempre dependiendo de las condiciones pluviométricas de cada año y de la disponibilidad de plantas herbáceas.

Por todo esto, la eliminación del matorral y arbustos, además de afectar a la capacidad de regeneración y mantenimiento del bosque mediterráneo, limita la disponibilidad de recursos para el ciervo en verano. En las fincas en las que se ha reducido el matorral y ha sufrido una profunda modificación el bosque mediterráneo, los ciervos son más vulnerables a las condiciones climáticas.

La toma de decisiones en la gestión cinegética de los ciervos se hace aún más difícil debido al escaso conocimiento de las relaciones planta-herbívoro en ambientes mediterráneos, y a la escasa tradición en la investigación y en el manejo de los ungulados silvestres para uso cinegético. En estas circunstancias, donde el ciervo es a la vez un recurso económico importante y un problema para su propia historia vital, la conservación de los hábitats y la biodiversidad de los ecosistemas, se hace imprescindible la investigación científica y el desarrollo de métodos de gestión específicos para *Cervus elaphus hispanicus* en la península Ibérica.

CONCEPCIÓN AZORIT CASAS
Area de Zoología
de la Universidad de Jaén

Invasiones de plantas vasculares exóticas

Diferencias entre las zonas continentales y costeras de la península Ibérica

Suele darse por cierto que el fenómeno de las invasiones biológicas constituye uno de los cuatro motores principales del cambio global, junto con el cambio climático, los cambios de uso del territorio y la sobreexplotación de los recursos y la contaminación. Nunca en toda la historia de la humanidad se había producido un intercambio biótico a escala mundial como el actual. La facilidad y rapidez con que tienen lugar las comunicaciones y los flujos comerciales está propiciando el traslado y la introducción, deliberada o casual, de especies exóticas de flora y fauna.

Las invasiones biológicas producen impactos ambientales y económicos no deseables. Los organismos exóticos afectan a las poblaciones de especies nativas, entre las que pueden causar enfermedades, predaciones, competencia por los recursos (agua, nutrientes, luz, polinizadores, espacio, etc.), hibridaciones y una evolución bajo presiones selectivas diferentes de las originales. En comunidades y ecosistemas, tienen consecuencias igualmente múltiples: destruyen ecosistemas enteros al sustituir las especies nativas por las foráneas, con una profunda alteración del medio; modifican el paisaje; incrementan la frecuencia e intensidad de los incendios; se interponen en las cadenas tróficas, en el ciclo hidrológico o en los ciclos biogeoquímicos. En términos más globales, la introducción de especies exóticas reduce la biodiversidad y disminuye el grado de originalidad biológica.

Esto último se entiende muy bien con un ejemplo, que nos valdrá para centrarnos ya en las plantas vasculares exóticas. Imaginemos que llevamos a cabo el inventario de la flora presente en una zona de alta montaña, donde la influencia humana es casi nula —a una altitud superior a los 3000 metros, para el caso de los Pirineos o Sierra Nevada—, y que hacemos lo mismo en una zona muy antropizada, como cualquier ciudad del sur de Europa y su área periurbana de influencia, en una superficie equivalente. Si comparásemos los resultados, la lista de especies de plantas vasculares inventariadas sería bastante más amplia en el caso de la ciudad, pero se trataría en su mayoría de especies banales, cosmopolitas, muchas de ellas exóticas, prácticamente las mismas que encontraríamos en cualquier otra ciudad del mismo ámbito geográfico.

En la zona de alta montaña la relación será mucho más corta, pero constará en su mayor parte de especies muy especializadas en soportar un ambiente tan poco favorable para la vida vegetal (frío extremo, viento desecante, alta insolación, sequía edáfica por pedregosidad). Ninguna de ellas será exótica; muchas serán endémicas, exclusivas de la cordillera o incluso del propio macizo donde hayamos realizado el estudio.

La fitodiversidad parece superior en el caso de la ciudad debido al mayor número de especies presentes, pero en realidad no es así, ya que la diversidad biológica hay que entenderla sobre todo en términos de originalidad, y mientras la zona de alta montaña resulta muy original, la zona urbana es exactamente lo contrario. Este ejemplo sirve también para poner de manifiesto la importancia que tiene la presión demográfica humana en la magnitud de las invasiones, al ser el hombre el

principal suministrador de diásporas —estructuras con las que las plantas se diseminan, como las semillas o las esporas— de especies exóticas.

El concepto actual de planta invasora se define en términos ecológicos, libre de toda connotación antropocéntrica. Se entiende por especie exótica o alóctona a la transportada e introducida por el hombre en una zona no perteneciente a su rango geográfico de distribución natural, salvando a menudo accidentes y fronteras biogeográficas que de otro modo serían infranqueables. Dentro de las especies exóticas, una primera categoría sería la de aquellas que en algún momento han prosperado en su nueva región sin la ayuda que el ser humano hubiese podido proporcionales en forma de cultivos, continuidad en la aportación de diásporas, etc. Si la presencia de tales especies es efímera, se las llamará especies “casuales” o “subespontáneas”. Si por el contrario permanecen al menos durante diez años, con la capacidad de formar poblaciones autoperpetuantes, diremos que se trata de especies naturalizadas.

Dentro de las especies naturalizadas, se definen las especies invasoras como aquellas que aumentan su distribución espacial en la zona de llegada del siguiente tenor: si se trata de una especie con reproducción sexual, ha de poder generar nuevas poblaciones a una distancia mínima de 100 m del foco original durante un período de al menos 50 años; si se trata de una especie con reproducción vegetativa, la distancia de expansión deberá ser mayor de 6 m a lo largo de un plazo no inferior a 3 años.

Si una especie invasora produce impactos de cualquier índole sobre las especies, comunidades o ecosistemas presentes en el área invadida, se dirá que es una especie transformadora. Si produce efectos indeseables para el ser humano (mermas en el rendimiento de los cultivos, ocupación de las vías de comunicación, obstrucción de la hidrografía construida y daños contra el patrimonio histórico o artístico), se hablará de una mala hierba exótica. Como se puede ver, varias de estas categorías no son excluyentes; definen subgrupos. Una especie transformadora es siempre invasora, pero no al contrario.

La incidencia del fenómeno que nos ocupa es muy desigual de unas zonas a otras del planeta. En general, las zonas costeras e insulares presentan una mayor capacidad de acogida de especies vegetales exóticas; se debe a la atenuación de las condiciones térmicas del clima inducida por el efecto tampón que ejerce el mar.

Además, en las islas, en razón de sus particulares condiciones de aislamiento, la evolución y especiación se ha llevado a cabo en condiciones de escasa competencia, lo que hace que su flora nativa, rica en endemismos, resulte poco competitiva frente a las especies introducidas.

En el caso particular de España, ciertas comarcas costeras, como el Baix Camp en la provincia de Tarragona, presentan un porcentaje de flora alóctona que llega a ser del 20 % del total; esto es, de cada cinco especies de plantas vasculares presentes una es exótica. En los archipiélagos, las cifras son también muy altas, del 16 % en Baleares y el 33 % en Canarias. Por el contrario, en las zonas del interior, alejadas del mar, las cifras descienden significativamente, quedando por debajo del 10 %. Tales son los casos estudiados de las provincias de Toledo (5 %), Huesca (7 %) y Segovia (8,5 %).

Para el conjunto de España, la flora introducida supone el 12 %, lo que está en consonancia con lo observado



1. Invasión de *Opuntia engelmannii* en la riera de l’Alforja (Cambrils, Tarragona).



2. Invasión de *Opuntia dillenii* en una zona de carrascal mesomediterráneo aragonés en recuperación (Alcalá de Gurrea, Huesca).

en otros países del sur de Europa y de la cuenca mediterránea. Esto es debido principalmente a las condiciones impuestas por el clima mediterráneo continentalizado, que se caracteriza por la fuerte oscilación térmica estacional (inviernos fríos y veranos calurosos) y la prolongada sequía estival coincidente con el período de temperaturas más altas. En estas condiciones, las especies vegetales han de adquirir adaptaciones específicas de las que carecen la mayoría de las especies exóticas. De ahí que estas últimas queden restringidas a ambientes donde las condiciones climáticas extremas están atenuadas, sobre todo en lo que respecta al régimen hídrico, ya sea de forma natural, como sería el caso de las zonas riparias o los humedales, o artificial, como el de los cultivos de regadío o las infraestructuras hidráulicas.

A lo largo de la historia de la humanidad, desde su cuna en Babilonia y Egipto, no han cesado las migraciones antropógenas de especies vegetales. La mayoría de las introducciones se han debido a la expansión de la agricultura, ya se trate de especies cultivadas o de especies arvenses (malas hierbas) asociadas a los cultivos y que se han transportado fortuitamente con éstos, como consecuencia de la propia actividad agrícola, al contaminarse lotes de semillas con diásporas de malas hierbas.

En la Antigüedad y la Edad Media, el flujo se estableció principalmente de oriente hacia occidente. Tras el descubrimiento de América en el año 1492, se abrieron las grandes rutas comerciales marítimas que propiciaron la conexión intercontinental, con lo que se produjo un nuevo flujo entre ambos lados del océano Atlántico. Se crearon jardines de aclimatación para estudiar la viabilidad del cultivo en el Viejo Mundo de las especies útiles encontradas en América, a la vez que los principales cultivos conocidos por los europeos se introducían en tierras americanas para favorecer su colonización.

A partir de finales del siglo XIX comenzó a imponerse una nueva concepción de la jardinería, que buscaba la originalidad en lo exótico. Ello dio lugar a la pérdida de importancia de la agricultura en favor de la jardinería como principal vía de introducción de especies de plantas vasculares exóticas. Esta tendencia se ha mantenido hasta nuestros días; en las zonas costeras españolas la jardinería es con diferencia la fuente principal de flora exótica introducida, debido a la masiva urbanización del litoral, donde casi exclusivamente se emplean especies ornamentales exóticas, muchas de ellas poco rentables desde el punto de vista de la economía hídrica. En la comarca tarraconense del Baix Camp el 75 % de las especies alóctonas invasoras se han introducido por malas prácticas jardineras, entre otras el vertido de restos de podas y limpiezas de jardines en el medio natural y el empleo sin ninguna precaución de especies con un amplio historial de episodios de invasión en otros lugares. En las áreas del interior de la Península, si bien va en aumento la función desempeñada por la jardinería, todavía es cuantitativamente superior el contingente de especies alóctonas invasoras ligadas a la agricultura, sobre todo de regadío.

Resulta, por tanto, aconsejable fomentar una nueva jardinería basada en nuestra rica flora autóctona, con bajos requerimientos hídricos (la "xerojardinería"). Si pese a todo se recurre a especies foráneas, conviene que tengan al menos un historial "limpio" en lo que a procesos de invasión se refiere.

MARIO SANZ ELORZA
Jefe del Area de Rústica
Gerencia Territorial del Catastro
Segovia

Wolf Isbert

Un hábitat anfibio



1. Las marismas del mar del Norte: un hábitat cambiante.

WOLF ISBERT

Las marismas del norte de Europa central se extienden a lo largo de más 450 kilómetros: desde la costa de los Países Bajos hasta Dinamarca. Esta llanura de aguas someras e islas cubre una superficie de 8000 kilómetros cuadrados. Se trata de un ámbito natural relativamente reciente; existen en su dimensión actual desde hace sólo algunos siglos.

Debido a la influencia de las mareas, este hábitat anfibio experimenta un cambio dos veces al día: durante la marea baja, las áreas arenosas, de varios kilómetros de extensión, se hallan al descubierto; en el curso de la marea alta, en cambio, quedan sumergidas. Por un período de algunas horas, la fauna que habita esta zona se ve sometida a condiciones terrestres, mientras que, cuando sube la marea, viven bajo condiciones acuáticas. La escasa profundidad de la zona de marismas hace que la climatología influya durante todo el año mucho más en la biota que en otras zonas costeras. El aporte de agua dulce a través de la lluvia y los ríos, así como la evaporación o la formación de hielo, actúan sobre la fauna de forma distinta en el transcurso de las estaciones.

Son pocas las especies que se han adaptado a vivir durante todo el año en este hábitat cambiante. Se trata de un área singular, pobre en diversidad de especies de invertebrados pero rica en número de organismos. Constituye un refugio ideal y fuente de alimento para millones de aves, que la utilizan como cuartel de invierno o para descansar en sus largos periplos migratorios; al segundo grupo pertenecen el correlimos gordo, algunas especies de ánsar común y otras aves que se dirigen al Artico. Poblaciones de otarios viven y se reproducen en esta zona. Algunas especies de peces aprovechan la productividad del lugar en una fase concreta de su vida; así, el pez platija, que medra durante su fase adulta en las aguas abiertas del mar del Norte, pasa en las marismas sus fases larvaria y juvenil, donde se alimenta de bivalvos y gusanos que habitan en esas aguas.

La riqueza de este hábitat en fauna piscícola resulta evidente: la mitad de las especies de peces del mar del Norte viven en las marismas. Sin embargo, la influencia humana se hace patente en forma de contaminación, pesca de arrastre continuada, invasión de especies exóticas y turismo incontrolado. A los factores antropogénicos se añaden el aumento de la temperatura y del nivel del mar, graves amenazas para un sistema tan sensible como éste.



2. Estos limos quedan sumergidos bajo el mar dos veces al día; otras dos veces se hallan en condiciones terrestres.

3. Otarios que aprovechan la marea baja para descansar sobre un banco de arena.

4. Montaña de arena formada por las heces de un gusano de arena. Este organismo constituye un alimento fundamental para las aves.

Jeffrey D. Sachs

Círculos virtuosos y estados frágiles

Para promover una democracia estable en naciones que sufren conflictos, lo mejor es enviar alimentos, semillas y medicamentos en el momento oportuno

Si los dirigentes estadounidenses entendieran mejor la política de los países sumidos en la pobreza y la crisis, promoverían su desarrollo económico y fomentarían la democracia; así protegerían mejor la seguridad nacional de EE.UU. La administración de George W. Bush ha manifestado a menudo que se compromete a difundir la democracia, en parte para combatir los riesgos del terrorismo; sin embargo, recurre demasiado a la amenaza y los métodos militares y olvida la ayuda estratégica. Si en el momento oportuno se ayudase al desarrollo de los lugares donde la democracia se tambalea, los beneficios serían enormes.

Para las naciones en profunda crisis, no hay mayor peligro que el de las profecías que se cumplen por sí mismas. Fijémonos en dos de esos países: Liberia, que está saliendo de una prolongada guerra civil, y Haití, que lleva años y años con una gran inestabilidad política. Aunque las dos naciones han elegido recientemente nuevos gobiernos democráticos, ambas están bajo la amenaza permanente de la violencia y el desorden internos.

Los países ricos envían asesores en vez de ofrecer ayuda práctica.

Cuando la población juzga que un gobierno nacional elegido hace poco va a tener éxito, los líderes locales brindan su apoyo a los nuevos dirigentes y las expectativas de que se mantengan en el poder aumentan. Si individuos y empresas creen que el gobierno contará con el poder de las fuerzas de seguridad para hacer cumplir las leyes tributarias, estarán mucho más dispuestos a pagar sus impuestos.

Se crea un círculo virtuoso. El aumento de la recaudación fiscal refuerza no solamente el presupuesto, sino también la autoridad política, y hace posible que se invierta en lo básico: profesores, carreteras, electricidad, policía. Así se promueven el orden público y el desarrollo económico. También se refuerza la confianza en la moneda, el dinero fluye hacia los bancos comerciales y se aleja el fantasma de la crisis bancaria.

Cuando la población piensa que un gobierno va a fracasar, ocurre el mismo proceso, pero a la inversa. El pesimismo divide a las fuerzas políticas, se pagan menos impuestos y se reducen los ingresos públicos, la policía y demás funcionarios dejan de cobrar el sueldo, la moneda se debilita y se retiran los depósitos de los bancos, con el consiguiente riesgo de un pánico bancario. El desastre alimenta el pesimismo.

Si la política exterior de EE.UU. tuviera en cuenta las necesidades más urgentes de estos frágiles estados, podría inclinar la balanza a favor de la consolidación de la democracia y la mejora económica. Un observador informado y con suficiente sensibilidad normalmente tiene claro cómo hay que actuar. Tanto Liberia como Haití carecen de servicio eléctrico, incluso en las respectivas capitales. Ambos se enfrentan a la hambruna y una producción insuficiente de alimentos. Los dos sufren de omnipresentes enfermedades infecciosas, controlables pero muy incontroladas.

Si cada familia campesina pobre recibiera una bolsa de fertilizante y unas semillas de alto rendimiento, se conseguirían buenas cosechas y abundante producción de alimentos. Si se hiciera una campaña nacional para extender la vacunación, las medicinas, el uso, contra la malaria, de las mosquiteras, los suplementos vitamínicos y los agentes desparasitadores, mejoraría la salud de la población, incluso sin tener que efectuar mejoras de largo alcance del sistema público de salud. Se puede restablecer la electricidad rápidamente en regiones clave, y se pueden construir millares de tomas seguras de agua en un solo año, mediante perforaciones o recurriendo a fuentes naturales de agua.

Aunque todas estas iniciativas requieren ayuda financiera, los costes son bajos. Demasiado a menudo, sin embargo, la respuesta de EE.UU. es negligente. En vez de ofrecer ayuda práctica, los países ricos y las agencias internacionales envían un torrente interminable de asesores para diseñar unos proyectos que, de llevarse a cabo, llegan demasiado tarde. Ignoran las peticiones urgentes de ayuda alimentaria. Tras unos meses, entre la población hambrienta, dividida y enferma se extiende el rumor de que "no ha cambiado nada", reanudándose así la espiral descendente. El pesimismo engendra más pesimismo. Finalmente, el gobierno cae y la incipiente democracia acaba por desaparecer.

Los responsables de la política exterior de EE.UU. harían una inversión inestimable en democracia, en desarrollo y en su propia seguridad nacional si consideraran detenidamente los problemas ecológicos a los que se enfrentan algunos países —sequía, cosechas insuficientes, enfermedad, aislamiento físico— e incrementaran el bienestar de los hogares comunes con donaciones rápidas y una asistencia bien dirigida. La administración Bush podría comenzar por estos dos lugares significativos, Liberia y Haití, para cumplir con su compromiso de extender la democracia.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia y del proyecto Milenio de la ONU.

La creación de un revolucionario motor a reacción hipersónico, capaz de situar en órbita un avión espacial de manera rutinaria y a coste asequible, es tarea ardua, aunque realizable

Reactores para un avión espac





1. UN LANZADOR ORBITAL DE DOS FASES, como este modelo de avión espacial militar Quicksat, quizá pueda algún día transportar personas y objetos al espacio a costes más bajos que los de los actuales cohetes. El uso de motores equipados con estatorreactores de combustión supersónica (o *scramjets*) lo haría posible.

DON FOLEY; CORTESIA DEL LABORATORIO DE ANALISIS DE IMAGEN Y CIENCIA DE LA TIERRA, CENTRO ESPACIAL JOHNSON, NASA (*Tierra*)

Thomas A. Jackson

Desde hace tiempo, se viene acariciando el sueño de construir una aeronave capaz de despegar del suelo, llegar al espacio exterior y regresar a la pista de aterrizaje, a la manera del caza Ala X de la *Guerra de las Galaxias*. Pero siempre se tropieza con el mismo obstáculo: un motor a reacción necesita oxígeno para la combustión, y en las capas superiores de la atmósfera ya no hay suficiente para mantenerlo encendido. El vuelo espacial requiere, pues, un cohete lanzador que lleve consigo el combustible y el oxidante. Incluso en el sistema de lanzamiento más avanzado de hoy, el transbordador espacial, casi la mitad del peso en el despegue corresponde al oxígeno líquido y al oxidante sólido que hay que transportar para mantener la ignición del cohete hasta alcanzar la órbita.

Una posible solución sería un estatorreactor (*ramjet*) de combustión supersónica, o *scramjet*. Este novedoso motor extraería oxígeno de la atmósfera durante la ascensión. Al no tener que cargar con el oxígeno porque lo captaría en vuelo, lograría un ahorro de peso que permitiría cuadruplicar la fuerza impulsora de un cohete por kilogramo de combustible consumido.

Por fin, tras decenios de desarrollo intermitente, los motores scramjet parecen ya capaces de volar. En 2007 y 2008 se realizarán ensayos decisivos a escala real en tierra. Para 2009 se han planificado pruebas en vuelo que den definitivo respaldo a esta técnica.

A diferencia del cohete que se encamina directamente a la órbita, la nave propulsada por un scramjet se elevaría igual que un avión, merced a la sustentación aerodinámica que le prestan las alas y el fuselaje; con ello ganaría en seguridad y capacidad de maniobra, pues si el vuelo se abortara podría planear y tomar tierra. Para despegar y acelerar hasta velocidades supersónicas (a partir de Mach 1, o 1223 kilómetros por hora) se utilizarían motores a reacción normales, que luego se sustituirían por el scramjet hasta llegar al régimen

hipersónico (de Mach 5 a Mach 15, límite teórico de estos motores). Por último, unos pequeños cohetes propulsores acelerarían la carga útil durante el resto del trayecto hasta la órbita. Mach 5 es el quíntuplo de la velocidad del sonido, alrededor de un kilómetro cada seis décimas de segundo. Compárese con el avión tripulado más veloz que toma aire de la atmósfera, el ya retirado SR-71 Blackbird de la Fuerza Aérea de EE.UU., que no pasaba de Mach 3,2.

Tales posibilidades revolucionarían el tráfico aéreo. Un avión espacial reutilizable capaz de comportarse como una aeronave normal podría convertir casi en rutina los viajes espaciales. Abarataría notablemente el envío de personas u objetos a órbita. Cabría imaginar vuelos regulares hipersónicos de muy largo alcance, por ejemplo de Nueva York a Sidney, en dos horas. Pero también las altísimas prestaciones del nuevo motor permitirían que las armas de un avión militar o misil hicieran blanco en cualquier punto del globo y en mucho menor tiempo que ahora.

En diversos lugares del mundo se investiga la manera de superar los ingentes desafíos técnicos que implican los vuelos hipersónicos con scramjets. Mi análisis se centrará en el programa que mejor conozco: el scramjet de técnica hipersónica (HyTech) de Pratt & Whitney y la Fuerza Aérea de EE.UU. También trabajan intensamente en estos desarrollos la Marina de EE.UU., la NASA, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa (DARPA), así como grupos de Australia, Reino Unido, Japón y otros lugares.

La pista hacia la altura

La propulsión por medio de estatorreactor de combustión supersónica se ideó hace mucho. Las patentes se remontan a los años cincuenta. A mediados de los sesenta se habían probado en tierra varios reactores de ese tipo, a velocidades de hasta Mach 7,3. General Electric, United Technologies, Marquardt, el laboratorio de física aplicada de la Universidad Johns Hopkins y el Centro de Investigación Langley de la NASA construyeron motores que consumían hidrógeno (el mismo combustible que usan el transbordador espacial y muchos otros cohetes). Mediados los años ochenta, el gobierno de EE.UU. acometió el programa Avión Aerospacial Nacional, que se basaba en estatorreactores de combustión supersónica. Sin embargo, tras invertir el equivalente a unos 1600 millones de euros, el proyecto se canceló en 1994 a causa de un recorte presupuestario de final de la guerra fría. En 2004, la NASA completó su programa Hyper-X; logró que volaran durante varios segundos dos scramjets de combustible de hidrógeno, cada uno de ellos a una sola velocidad y altitud. Después, en ese mismo año, el scramjet X-43A alcanzó la velocidad récord de Mach 9,6. Actualmente, la Fuerza Aérea de EE.UU. trabaja en una nueva generación de técnicas scramjet para acelerar un vehículo dentro de una gama de velocidades y altitudes, con un hidrocarburo líquido como combustible, que servirá también como refrigerante de la estructura del motor.

Los estatorreactores de combustión supersónica pertenecen a una familia de motores llamados de "aspiración atmosférica", que funcionan en diferentes márgenes de velocidad y altitud merced a las variaciones de un principio básico de generación de empuje. En general, los reactores comprimen el aire de la atmósfera, lo combinan con combustible, queman la mezcla y luego aprovechan la expansión de los productos de la combustión expelidos para generar un empuje en sentido contrario. Los motores más familiares para los pasajeros de líneas comerciales son los de turbina de gas, o turborreactores, que contienen cinco componentes esenciales: la admisión de aire; el compresor (una rueda de palas en un árbol giratorio) que succiona el aire y lo comprime; la cámara de combustión (o quemador) donde se inyecta y se quema el combustible; la rueda de la turbina, que gira al circular por sus álabes los gases calientes de la combustión y gobierna el árbol del volante del compresor; y por último, la tobera de escape, por la que se expanden los gases a alta temperatura para conseguir el empuje. Los motores de turborreacción actuales dan propulsión suficiente para volar a velocidad algo superior a Mach 3. A velocidades mayores, los componentes rotatorios se deterioran por sobrecalentamiento.

A velocidades por encima de Mach 2,5, el motor a reacción no necesita compresor ni turbina, si está diseñado para que el aire entrante se comprima. Este motor, llamado estatorreactor o ramjet, sólo contiene una tobera de admisión de aire, una zona de combustión, o quemador, y una tobera de escape. La admisión está diseñada para comprimir el aire y, al mismo tiempo, ralentizar su flujo hasta velocidades subsónicas. Los inyectores añaden combustible al flujo de aire, formando así una mezcla que se enciende y arde. Al pasar por un estrechamiento, o una constricción mecánica, los gases calientes de escape vuelven a acelerarse y se acercan a la velocidad del sonido; su posterior expansión por la tobera cónica los lleva a velocidades supersónicas. Cuando la aeronave supera el Mach 5, la desaceleración del aire en la admisión eleva la temperatura interna del motor hasta un punto en el que añadir calor al motor por vía de combustión ofrece un rendimiento muy bajo.

Resumen/Motores hipersónicos

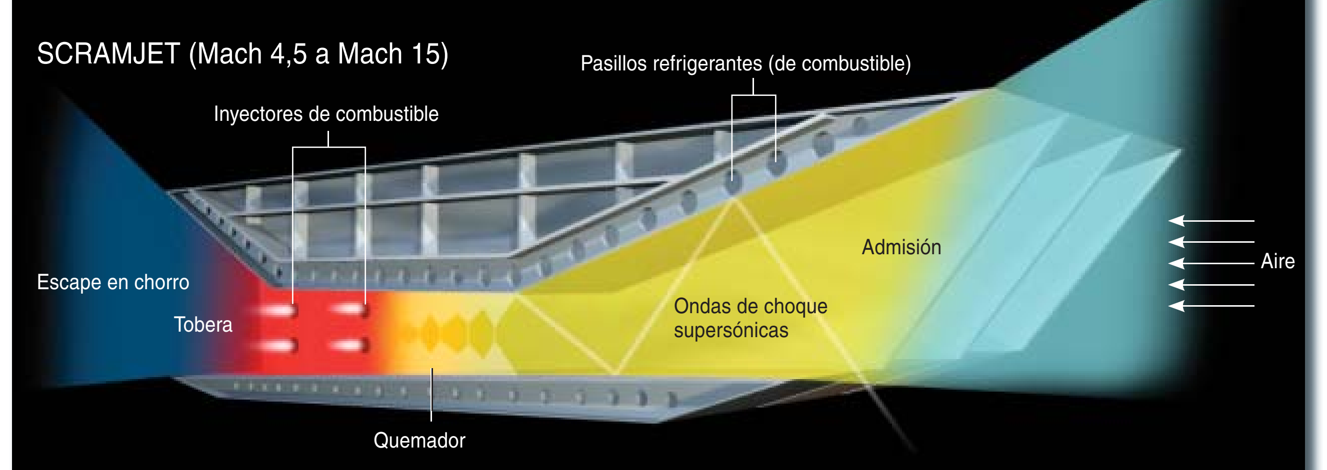
- Los estatorreactores de combustión supersónica, o *scramjets*, podrían propulsar misiles u otro tipo de armas, aviones espaciales y hasta aeronaves comerciales a velocidades hipersónicas, entre Mach 5 y Mach 15. (Mach 1 es la velocidad del sonido: 1223 kilómetros por hora al nivel del mar.)
- Los scramjets aspiran aire a velocidad supersónica, lo mezclan con combustible y queman la mezcla, inclusive a velocidad supersónica, para crear una tremenda fuerza propulsora. A diferencia de los cohetes, no necesitan transportar oxígeno ni oxidante, lo que economiza carga y proporciona un empuje hasta cuatro veces mayor por unidad de peso de combustible propulsor.
- Aunque sobre el papel el scramjet sea sencillo —no requiere turbinas con álabes giratorios—, la construcción de un reactor capaz de funcionar en diferentes regímenes de vuelo durante prolongados períodos supone desafíos técnicos erizados de obstáculos.

DON FOLEY; CORTESIA DEL LABORATORIO DE ANALISIS DE IMAGEN Y CIENCIAS DE LA TIERRA, CENTRO ESPACIAL JOHNSON, NASA (*Tierra*)

UNA FAMILIA DE MOTORES DE AVIACION

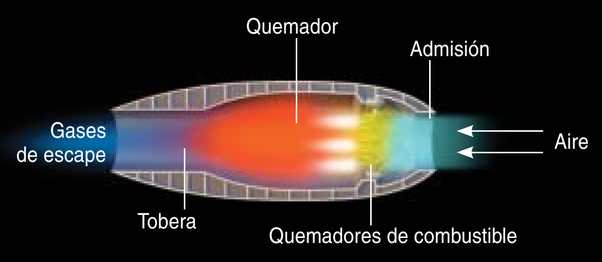
Los scramjets (estatorreactores de combustión supersónica) pertenecen a una familia de motores de propulsión a chorro (reactores) con un funcionamiento similar. En cada uno de ellos, la fuerza propulsora se logra al comprimir el aire aspirado, mezclarlo con combustible, inflamar la mezcla y expandir los productos de la combustión al expulsarlos por la tobera de escape.

SCRAMJET (Mach 4,5 a Mach 15)



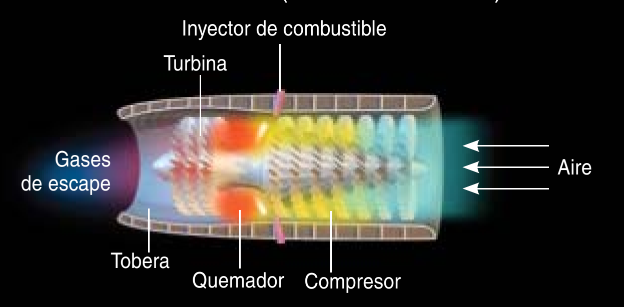
El aire penetra en la admisión a velocidad supersónica, y se comprime y desacelera al atravesar un trayecto angosto, lo que convierte en calor parte de su energía cinética. Los inyectores bombean combustible en el aire que contiene el quemador y el flujo todavía supersónico de la mezcla arde con rapidez, transformando en energía térmica la energía química del combustible. El estrecho paso interior encierra la mezcla a elevada temperatura, que se hincha, aumentando aún más la presión. Cuando los gases del escape llegan a la tobera, donde el paso se ensancha, la masa se expande y acelera hacia el exterior, cambiando su energía térmica en energía cinética propulsora.

RAMJET (Mach 2,5 a Mach 5 o 6)



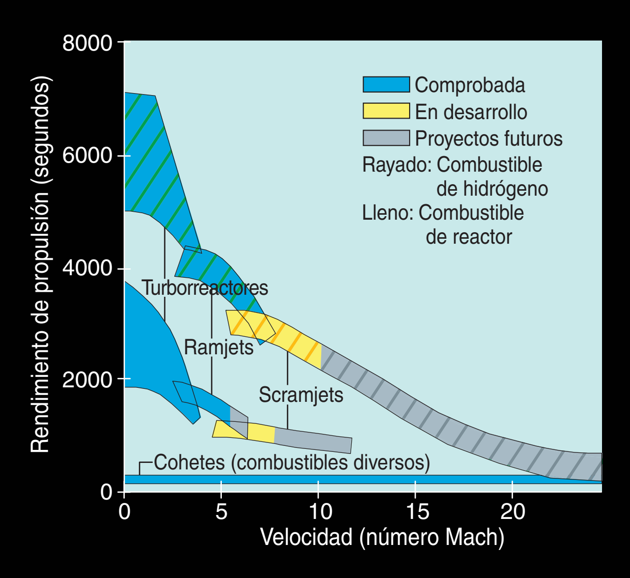
El funcionamiento de un ramjet (estatorreactor) se asemeja al del scramjet, salvo en su flujo interno de aire, que se mantiene a velocidades subsónicas.

TURBORREACTOR (Mach 0 a Mach 3)



Como se mueve con más lentitud, el turborreactor necesita una turbina de álabes giratorios para comprimir el aire de la admisión y producir el empuje.

RENDIMIENTOS



Cada tipo de motor tiene el diseño que mejor se acomoda a unas determinadas condiciones de velocidad y altitud del vehículo en vuelo. El combustible de hidrógeno ofrece mejores prestaciones, pero es difícil de almacenar en un espacio reducido y todavía carece de infraestructura de distribución. Los hidrocarburos combustibles, de manejo más fácil, proporcionan menos energía por unidad de peso. El rendimiento de la propulsión mide la efectividad relativa del motor: es la razón entre el empuje que el avión recibe del reactor y el peso del combustible que emplea por segundo.

DON FOLEY (*ilustraciones*); LUCY READING-IKKANDA (*gráfico*)

Programas seleccionados de I+D de estatorreactores de combustión supersónica

Además de los programas HyTech y SED X-51A de la Fuerza Aérea estadounidense, comentados en el texto, otros trabajos de investigación desarrollan la técnica del estatorreactor de combustión supersónica (*scramjet*).

PROGRAMA	FECHAS	INSTITUCION	LOGROS U OBJETIVOS
Hyper-X	1996–2004	NASA	El programa Hyper-X (X-43A) puso en vuelo pequeños vehículos para probar motores scramjet con hidrógeno como combustible. En un vuelo de prueba el X-43A llegó a rozar Mach 10.
HyShot	2001–hasta hoy	Universidad de Queensland, Australia (con el apoyo de asociados de Australia, Reino Unido, EE.UU., Alemania, Corea del Sur y Japón)	En julio de 2002, el grupo HyShot llevó a cabo el primer vuelo de prueba con éxito de un scramjet. El avión voló en descenso aproximadamente a Mach 7,6 durante seis segundos.
Demostración de vuelo hipersónico (HyFly)	2002–hasta hoy	DARPA y la Oficina de Investigación Naval (ONR)	El programa HyFly prepara la fabricación de un misil de crucero propulsado por ramjet/scramjet para volar a más de Mach 6. El motor de este vehículo lanzado por cohete lo desarrolló el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins.
Técnica de Prueba de Scramjet en Vuelo Libre Atmosférico (FASTT, dentro de HyFly)	2003–hasta hoy	Alliant Techsystems (con el apoyo de DARPA y ONR)	El vehículo scramjet, lanzado por cohete y con keroseno como combustible, llegó a volar a Mach 5,5 durante 15 segundos el 10 de diciembre de 2005.
Falcon	2003–hasta hoy	DARPA	El programa Falcon persigue construir un avión militar hipersónico autónomo (sin tripulación), capaz de alcanzar cualquier punto del mundo en aproximadamente dos horas. Podría tener aplicaciones civiles: quizá contribuya al desarrollo de un avión espacial orbital de una sola fase.

Por ello, el estatorreactor tiene su límite práctico entre Mach 5 y Mach 6.

Anatomía de un scramjet

Para generar más propulsión y volar a mayor velocidad que el estatorreactor, la versión de combustión supersónica reduce la compresión inicial del flujo de aire de manera que no baje tanto su velocidad, sino que, en condiciones ideales, se mantenga supersónica durante todo el proceso de combustión. Este reactor, al igual que el estatorreactor, no incluye partes móviles en el trayecto del aire: esencialmente consiste en un tubo con un estrechamiento, cuya forma recuerda a dos embudos unidos por sus partes angostas. Cuando está en funcionamiento, el aire que penetra a velocidad supersónica por la admisión (primer embudo), se comprime y calienta. En la zona central de circulación forzada (el quemador), se inyecta combustible al flujo de aire y se produce la ignición de la mezcla gaseosa, que se calienta todavía más. Los gases resultantes salen al exterior por la tobera de escape (segundo embudo) a velocidad superior a la de admisión del aire.

En cierto modo, como algunos tiburones, que para mantener su toma de oxígeno han de nadar sin descanso, un ramjet o un scramjet tiene que avanzar con rapidez para forzar la admisión de aire con la que arranca y crea el empuje. Esto implica que un vehículo de lanzamiento orbital propulsado por scramjet deberá integrar otro sistema, un cohete o una turbina de gas, que lo mantenga en movimiento hasta alcanzar la velocidad adecuada. En ese momento, el piloto del avión espacial pondría en marcha el scramjet para volar a la atmósfera superior, donde un cohete se encargaría de su inserción final en la órbita. El diseño de un sistema de propulsión que integre los diferentes ciclos de motor constituye un problema de optimización en el que concurren el tamaño de la carga útil, la órbita prevista, el alcance y velocidad por la atmósfera y la posibilidad de incorporar armas.

El punto más crítico en el funcionamiento de un estatorreactor de combustión supersónica consiste en la brevísima permanencia del aire dentro del motor —milésimas de segundo—, con lo que la ignición del combustible se asemeja a encender una cerilla dentro de un tornado y conseguir que siga ardiendo. La clave reside en el extremo refinamiento de la forma interior del tubo y en localizar en qué parte de ese tubo se libera el calor de la combustión. Para generar un empuje estable, un scramjet práctico ha de controlar con precisión la velocidad y la presión del aire que circula por el motor y medir el combustible que entra al quemador, de tal manera que arda por completo y desprenda la energía que se vaya necesitando. El cuidadoso control de la relación entre la superficie de circulación y el calor liberado hace innecesaria la constricción mecánica del ramjet y permite mantener un flujo supersónico a través del quemador del scramjet.

Quienes investigan sobre tales reactores saben que es esencial administrar ajustadamente la energía térmica en su interior. A la estructura llega calor que proviene del rozamiento y del proceso de combustión; este aflujo de calor puede amplificarse en gran escala mediante ondas de choque internas que inciden en la pared del motor. Si toda la energía cinética del flujo hipersónico de aire admitido se convirtiera en energía térmica, sobraría calor para fundir la estructura metálica del motor. Por otro lado, sin una desaceleración suficiente, el aire avanzaría por el motor con excesiva rapidez, a temperatura y presión demasiado bajas para mantener encendido el combustible.



2. LOS SCRAMJETS adoptan distintas formas, pero todos requieren cohetes lanzadores para acelerarse hasta la velocidad que les permite arrancar. El vehículo experimental de la NASA X-43A, semejante a un avión (*arriba*), que fijó en Mach 9,6 el récord de velocidad para un reactor de aspiración atmosférica, se lanzó desde un cohete Pegasus, de Orbital Sciences. Los scramjet de HyShot fueron lanzados desde cohetes Terrier-Orion (*a la derecha del todo*), como también lo fuera el scramjet de FASTT, de configuración similar, al que aquí se ve en una utilización como misil militar (*centro*).





NASA/DRYDEN FLIGHT RESEARCH CENTER (*X-43A*); ATK (*FASTT*); CHRIS STACEY *Universidad de Queensland (HyShot)*

Para impedir que se funda la estructura por la fricción del flujo supersónico de aire, se recurre a sistemas de "refrigeración activa". Unas bombas mantienen en constante circulación, a través de pasillos practicados en el motor y el fuselaje, un combustible refrigerante que evacua el calor que podría provocar daños. Este proceso ofrece la ventaja auxiliar de preparar el combustible para que arda con rapidez en el quemador. Durante varias décadas se ha aplicado con éxito esta técnica de enfriamiento a los cohetes ordinarios, habitualmente refrigerados por hidrógeno líquido. El uso de un hidrocarburo combustible en tal entorno es más conflictivo, porque un hidrocarburo calentado en exceso se descompone fácilmente en carbón sólido que puede obstruir los pasillos de refrigeración. Otros inconvenientes de estos sistemas son el peso y la complejidad que introducen, así como la necesidad de permanecer activos, pues la pérdida del refrigerante causaría un fallo estructural catastrófico.

El funcionamiento correcto de un estatorreactor de combustión supersónica es, por tanto, un delicado ejercicio de equilibrio, complicado aún más por el hecho de que la configuración geométrica del paso del aire se optimiza para un conjunto singular de condiciones de vuelo (velocidad, altitud y otras). En el caso ideal, las dimensiones físicas y la forma del trayecto que recorre el aire deberían irse acomodando sin cesar a los cambios de velocidad y altura del vehículo; sin embargo, las superficies interiores móviles, resistentes al calor, y las consiguientes uniones mecánicas podrían sobrepasar las prestaciones de los materiales y las estructuras actuales. La exigencia de mover continuamente las superficies interiores del motor, muy calientes, teniendo además que sellar los pasillos contra la fuga de gases del motor a temperatura elevada, sigue alzando una barrera contra el pleno aprovechamiento del ciclo del scramjet.

El proyecto HyTech

Pese a los obstáculos técnicos inherentes a los scramjets, se han logrado ya éxitos prometedores. Uno de ellos es el programa HyTech de la Fuerza Aérea de EE.UU., iniciado en 1995. Un grupo de científicos e ingenieros del gobierno, la industria y la universidad se concentraron en la parte que consideraron más abordable de un estatorreactor de combustión supersónica. En primer lugar, había que conseguir motores pequeños y desechables, como los de un misil, que por su tamaño pudieran encajar en las instalaciones de prueba en tierra disponibles, para facilitar su evaluación técnica. Funcionarían una sola vez, relegando a una etapa posterior el complicado desarrollo de estructuras de vuelo reutilizables. La complejidad se redujo al mínimo posible, limitando entre Mach 4 y Mach 8 el margen de operación y especificando un trayecto del flujo de configuración geométrica fija.

Por último, se decidió utilizar en el HyTech combustible JP-7, un hidrocarburo líquido desarrollado originalmente para el programa SR-71 Blackbird. Como antes se ha señalado, en un scramjet refrigerado por combustible, éste opera como sumidero de calor (el combustible mismo es el medio que administra la sobrecarga térmica). El equilibrio térmico del sistema requiere que la cantidad de combustible necesaria para absorber el exceso de calor de la estructura no sobrepase la que exige la propia combustión. El programa HyTech busca que ese equilibrio se produzca a Mach 8, y el JP-7 ha demostrado ser muy adecuado para ello.

Como indican los análisis de comportamiento, un propulsor que tome aire de la atmósfera podrá competir en

eficacia con un cohete lanzador, siempre que funcione bien en torno a la mitad de su velocidad máxima. En consecuencia, se pretendió fijar en Mach 4 la velocidad de arranque del scramjet, objetivo difícil porque a esa velocidad el aire penetra en el quemador a una temperatura muy inferior a la de autoinflamación del combustible. Por eso, el reactor necesita una ayuda a la ignición; valdría un aditivo químico, que rebajara esa temperatura de autoinflamación, o un dispositivo que inflamara el combustible mediante la generación de un gas muy caliente, que se inyectaría en la mezcla de aire y combustible. A velocidades más altas en número Mach, es mucho más fácil encender y estabilizar la llama, hasta llegar a velocidades muy elevadas en las que el breve tiempo de permanencia dentro del motor dificulta el mantenimiento de la combustión.

En 2003 el grupo HyTech desarrolló unos componentes y subsistemas integrados del estatorreactor de combustión supersónica que cumplían, e incluso superaban, la mayoría de los objetivos originales del programa. Sin embargo, pese a las intensas pruebas en tierra, aún persistían notables incertidumbres en el desarrollo. Todos ellos se refieren al mantenimiento de las prestaciones en condiciones transitorias —cambios de velocidad, altitud y posiciones de admisión de gas— y resultan harto difíciles de investigar en túneles aerodinámicos; de ahí que convenga abordarlos en vuelos de prueba.

Por tal motivo, el Demostrador del Motor Scramjet (SED, por sus siglas en inglés) de la Fuerza Aérea de EE.UU., hoy llamado X-51A, pondrá a volar alguno de esos sistemas HyTech en 2009. Será una evaluación continuada en vuelo de esta técnica, todavía en perfeccionamiento. Los ensayos en tierra y un detallado análisis por computador han permitido el desarrollo de un scramjet, con refrigeración activa y peso idéntico al de vuelo, apropiado para las pruebas del programa SED.

Ante la incapacidad actual de alterar la forma interior del motor durante el vuelo para acomodar sus prestaciones a cambios rápidos de velocidad y altitud, el grupo SED optó por construir un trayecto del flujo de configuración geométrica fija, que establece un compromiso entre una adecuada aceleración en el extremo inferior de su margen de velocidades (Mach 4,5 a Mach 7) y un régimen de crucero eficaz a la velocidad máxima de Mach 7. Administrar la distribución de combustible dentro del motor es el medio principal para tenerlo controlado: en empuje, aceleración y mantenimiento de un funcionamiento estable.

El material básico del motor es el acero, refrigerado activamente por la circulación interna de combustible. Componentes cerámicos resistentes al calor sustituyen el acero en ciertas aristas prominentes —las zonas delanteras expuestas a la embestida directa del chorro de aire caliente—, demasiado afiladas para incorporar pasillos refrigerantes. La unión fiable de las partes refrigeradas con las que no lo están, aunque problemática, resulta imprescindible. Es evidente que un fallo precoz de la estructura (antes de que el misil llegue a su destino) desencadenará un fallo catastrófico. Otro problema consiste en las distintas dilataciones térmicas de los componentes metálicos y cerámicos, que distorsiona la forma geométrica del paso de aire y malogra las tentativas de controlar el funcionamiento del reactor. La creación de un material compuesto carbono-carbono, resistente al calor, con junturas machihembradas superó el problema.

El uso de JP-7 para propulsar y refrigerar el estatorreactor de combustión supersónica es esencial para el éxito del X-51A. Hasta ahora, se había elegido hidrógeno como el mejor combustible en la mayoría de los programas de desarrollo del scramjet. Comparados con el hidrógeno, los hidrocarburos suelen ser menos reactivos, contienen menos energía por unidad de peso y es menor su capacidad calorífica para refrigerar estructuras. Sin embargo, se utilizan corrientemente en los demás sistemas de vuelo de la Fuerza Aérea. Existe, pues, una estructura global de distribución y tratamiento. Por añadidura, los hidrocarburos se almacenan mejor; al contener más energía por unidad de volumen, ocupan menos espacio a bordo que una cantidad de hidrógeno de igual contenido energético.

Para compensar la inferior reactividad de los hidrocarburos y su menor capacidad calórica, el programa HyTech aprovecha el potencial endotérmico del JP-7, es decir, su poder de absorber calor por medios químicos. Cuando estos combustibles captan calor de su entorno en ausencia de oxígeno y en presencia de un catalizador apropiado, sus largas y complejas cadenas de polímeros se descomponen en otras secuencias, cortas y sencillas. En este proceso, el combustible absorbe hasta cinco veces su capacidad calorífica latente (la energía absorbida por



3. EL DEMOSTRADOR DEL MOTOR SCRAMJET X-51A (*abajo*) probará en vuelo, en 2009, el estatorreactor de combustión supersónica y el fuselaje preparados por el programa HyTech de la Fuerza Aérea de EE.UU. El prototipo de scramjet más reciente (*derecha*) ha completado una serie de ensayos en tierra, en el túnel de altas temperaturas y 2,43 metros de diámetro del Centro de Investigación Langley de la NASA. Allí sólo se probó el motor, con un peso idéntico al de vuelo, en posición invertida, para que conductos y cables de la instrumentación llegasen a él a través del pedestal de soporte.

DON FOLEY (*ilustración*); PAUL BAGBY NASA (*fotografía*)

simple calentamiento del líquido). Además, la absorción endotérmica convierte el combustible en un gas caliente que contiene hasta el 10 por ciento más de energía que el combustible líquido sin calentar. Por último, los hidrocarburos resultantes, de bajo peso molecular, son más reactivos que las moléculas de combustible originarias y es más fácil que ardan en el breve tiempo que permanece el combustible dentro del scramjet.

Se ha logrado un motor de geometría fija de tamaño suficiente para propulsar un vehículo de tipo misil: alimentado con hidrocarburos como el JP-7, este motor puede arrancar a Mach 4,5 y después acelerar hasta Mach 7. También se cuenta con técnicas estructurales de refrigeración activa y resistencia a la temperatura que mantienen el equilibrio térmico mientras haya combustible a bordo. En 2009, el vehículo de vuelo libre X-51A será impulsado por un cohete hasta alcanzar la velocidad de arranque del scramjet y entonces se lo dejará en libertad. Se espera que su vuelo confirme la validez de las técnicas aquí reseñadas.

Los retos del futuro

Aunque las pruebas de vuelo del SED sean positivas, mucho quedará por hacer para que se utilice el estatorreactor de combustión supersónica en las armas de respuesta rápida, los cruceros hipersónicos regulares y un acceso más asequible al espacio.

Los estatorreactores de combustión supersónica han de poder funcionar en un amplio margen de números Mach. Como ya se ha indicado, las turbinas de gas actuales operan desde Mach 0 a Mach 3 o 4, mientras que los cohetes son imprescindibles para trayectos de vuelo en los que se supera aproximadamente Mach 15. A velocidades tan elevadas, el calentamiento térmico sería intolerable para los scramjets, que han de volar a altitudes en las que se pueda aspirar aire suficiente para quemar el combustible. Por tanto, es preciso desarrollar reactores capaces de ocupar la mayor parte posible del hueco intermedio, desde Mach 4 hasta Mach 15. En ciertas aplicaciones, el scramjet habrá de integrarse plenamente con un propulsor de menor velocidad, como la turbina de gas. Esto implica la superposición de distintos regímenes operativos del motor para lograr una transición progresiva. Deberá procurarse, además, que la masa adicional de los diversos sistemas propulsores no sobrecargue los vehículos equipados con múltiples motores, y al mismo tiempo, que se controlen con precisión las transiciones del uso de unos y otros propulsores.

El X-51A, con su forma geométrica fija, no puede disminuir sensiblemente su límite operativo. Se necesitará una geometría interior variable para que un scramjet pueda volar a números Mach por debajo de 4. Aunque no forme parte del programa SED, la Fuerza Aérea y la NASA han exhibido en un motor del HyTech un prototipo de admisión de geometría variable; su aerodinámica se modifica mediante alerones móviles.

Las características del combustible pueden también limitar las prestaciones de un scramjet en ambos extremos del margen operativo actual. Por su diseño, el X-51A sólo puede funcionar tras un calentamiento de la estructura suficiente para que el combustible JP-7 pase a estado gaseoso. En los quemadores de scramjet de la próxima generación quizás haya que utilizar, para números de Mach bajos, durante un tiempo muy breve, combustible líquido y sustituirlo luego por otro totalmente gaseoso durante el vuelo. La densidad de los líquidos es mil veces mayor que la de los gases; por tanto, repostar el scramjet manteniendo estables la combustión y el empuje durante la transición del combustible líquido al gaseoso constituye una tarea sumamente delicada. Sin embargo, su viabilidad ha quedado demostrada en pruebas realizadas en el marco de la investigación HyTech. En el extremo superior de la gama de velocidades, cerca de Mach 8, la capacidad calorífica de los combustibles de los reactores resultará insuficiente, incluso en los que admiten descomposición endotérmica como el JP-7. Volar más deprisa exigirá combustibles radicalmente diferentes y avanzados materiales resistentes al calor; o, tal vez, el uso de hidrógeno, a pesar de sus inconvenientes logísticos y de transporte a bordo.

El programa HyTech se ha centrado inicialmente en vehículos de tamaño de misil, lanzados desde aeronaves. Los vuelos hipersónicos regulares y el acceso al espacio exigirían vehículos mucho mayores. Los programas Falcon, de DARPA, y el Robust Scramjet, de la Fuerza Aérea, iniciados ambos en 2003, persiguen aumentar el tamaño de los motores y centuplicar la capacidad de admisión de aire de los actuales dispositivos HyTech.

Los recientes desarrollos de los estatorreactores de combustión supersónica han supuesto grandes avances en la superación de los obstáculos mayores con que tropiezan los vuelos regulares de alta velocidad. Si se persiste en el progreso, nos iremos acercando, aunque sea palmo a palmo, hacia algo que nos recuerde el motor de un Ala X de la *Guerra de las Galaxias*.

El autor

Thomas A. Jackson es vicerresponsable científico de la División de Propulsión Aerospacial, Laboratorio de Investigación de la Fuerza Aérea de EE.UU., en Ohio. Doctorado en ingeniería mecánica por la Universidad de California en Irvine, en 1985, investiga las técnicas de combustión e inyección de combustible en motores de propulsión.

Bibliografía complementaria

RAMJETS. Preparado por Gordon L. Dugger. American Institute of Aeronautics and Astronautics Selected Reprint Series, 1969.

A PROCEDURE FOR OPTIMIZING THE DESIGN OF SCRAMJET ENGINES. P. J. Waltrup, F. S. Billig y R. D. Stockbridge en *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 16, n.º 3, págs. 163-171; mayo-junio de 1979.

RESEARCH ON SUPERSONIC COMBUSTION. F. S. Billig en *Journal of Propulsion and Power*, vol 9, n.º 4, págs. 499-514; julio-agosto de 1993.

HYPERSONIC AIRBREATHING PROPULSION. William H. Heiser, David T. Pratt, Daniel H. Daley y Unmeel B. Mehta. American Institute of Aeronautics and Astronautics Education Series, 1994.

INVESTIGATION OF SCRAMJET INJECTION STRATEGIES FOR HIGH MACH NUMBER FLOWS. D. W. Riggins, C. R. McClinton, R. C. Rogers y R. D. Bittner en *Journal of Propulsion and Power*, vol 11, n.º 3, págs. 409-418; mayo-junio de 1995.

1. EL ESTUDIO ESFORZADO es clave para lograr el éxito en ajedrez, en música clásica, en fútbol y en otras muchas actividades. La motivación importa más que la capacidad innata.

LA MENTE DEL EXPERTO

Estudios sobre los procesos mentales de grandes maestros de ajedrez han revelado indicios de cómo se alcanza la competencia también en otros campos

Philip E. Ross

Un hombre va recorriendo lentamente el interior de un gran corro de tableros de ajedrez, dedicándole a cada uno un vistazo de dos o tres segundos antes de hacer su jugada. Sentados por el exterior, docenas de aficionados meditan su siguiente movimiento mientras el maestro completa la ronda. Estamos en el año 1909, el hombre es el cubano José Raúl Capablanca y el resultado abruma: 28 tableros, 28 victorias. La exhibición formaba parte de una gira en la que Capablanca ganó 168 partidas seguidas.

¿Cómo podía Capablanca jugar tan deprisa y tan perfectamente? ¿Cuántas jugadas anticipaba en tales condiciones? Se dice que Capablanca respondía: "Sólo veo la jugada siguiente, pero siempre es la correcta".

Y de este modo resumía en tan pocas palabras lo que ha venido a demostrar un siglo de investigaciones psicológicas, a saber, que gran parte de la ventaja del maestro sobre el jugador principiante es fruto de los primeros segundos de reflexión. Esta percepción rápida, guiada por el saber y la experiencia, a veces llamada "apercepción", se observa también en expertos de otras materias. Al igual que un gran maestro es capaz de recordar todos los movimientos de una partida que haya jugado, también un músico avezado logra a menudo reconstruir la partitura de una sonata que ha escuchado sólo una vez. Y lo mismo que el maestro ajedrecista suele encontrar la jugada óptima en un destello de inteligencia, también el médico experto da con un diagnóstico certero a los pocos momentos de poner sus ojos en el paciente.

Ahora bien, ¿cómo adquieren los maestros de estos diversos campos sus extraordinarias destrezas? ¿En qué proporción se deben a talentos innatos, y en cuál a una preparación intensa? La psicología ha buscado respuestas en estudios sobre los maestros de ajedrez. La recopilación de resultados de un siglo de tales investigaciones ha llevado a nuevas teorías que explican cómo la mente organiza y recupera la información. Y puede que estos trabajos tengan importantes consecuencias pedagógicas. Las mismas técnicas con que los maestros ajedrecistas pulen su destreza quizá sirvan en las aulas para enseñar a leer, a escribir o a calcular.

La drosófila de la ciencia cognitiva

La historia de los expertos empieza con la caza, destreza crucial para la supervivencia de nuestros remotos antepasados. El cazador avezado no sólo sabe dónde ha estado el león: también es capaz de inferir adónde irá. La habilidad rastreadora va aumentando desde la niñez, como demuestran numerosos estudios, y crece sin cesar, según una relación lineal, hasta la treintena, en que alcanza su máximo, según John Bock, antropólogo de la Universidad estatal de California en Fullerton. Ni la formación de un neurocirujano requiere tanto tiempo.

De no existir una superioridad inmensa y demostrable sobre los noveles, no puede haber verdaderos expertos:

ETHAN HILL



sólo habría legos con credenciales impresionantes. Estudios rigurosos efectuados en los últimos veinte años han demostrado que las inversiones de los asesores bursátiles profesionales no tienen mayor éxito que las de los aficionados, que afamados *connoisseurs* apenas distinguen los vinos mejor que el menos refinado de los mortales, y que psicoterapeutas con pomposas titulaciones no prestan a sus pacientes mayor ayuda que sus colegas con menos diplomas. E incluso cuando resulta indudable que de verdad existe la pericia en algo —como ocurre en la enseñanza o en la gestión empresarial—, a menudo resulta difícil medirla, y no digamos explicarla.

En cambio, la destreza ajedrecística sí puede ser medida, dividida en componentes, sometida a experimentos de laboratorio y observada fácilmente en su ambiente natural, el salón de torneos. Por eso el ajedrez ha sido el mayor y principal banco de pruebas de las teorías sobre el pensamiento, "la drosófila de la ciencia cognitiva", como se ha dicho.

La medición de la maestría ajedrecística se ha llevado más lejos que en otros juegos, deportes o actividades competitivas. Los resultados recientes de los jugadores se ponderan mediante fórmulas estadísticas frente a sus logros anteriores y se aplican coeficientes de descuento a sus victorias en función de la potencia de los adversarios. Todo este proceso fructifica en un sistema de clasificación que pronostica con notable fiabilidad los resultados de las partidas. Si el jugador A supera al B en 200 puntos, lo derrotará por término medio el 75 por ciento de las veces. Este pronóstico es igualmente válido tanto si los jugadores son primeras figuras como si se trata de meros aficionados. Veselin Topalov, el gran maestro que en julio de 2006 tenía la más alta puntuación, 2813, ganaría presumiblemente el 75 por ciento de sus encuentros con el gran maestro que ocupa en la misma lista el puesto número cien, Giovanni Vescovi, cuya puntuación es de 2619. De forma análoga, un jugador aficionado con una puntuación de 1200 (valor que corresponde, aproximadamente, a la mediana) ganará en los torneos un 75 por ciento de las veces a jugadores de nivel 1000 (percentil 40). Tales puntuaciones permiten a los psicólogos evaluar la pericia en función de los resultados (en vez de fiar en la mera reputación) y rastrear las variaciones que experimenta la capacidad de un jugador a lo largo de su carrera.

Otra de las razones por las que la ciencia cognitiva ha tomado el ajedrez como modelo —y no, por ejemplo, el billar o el *bridge*— es la reputación de este juego, según Goethe "la piedra de toque del intelecto". Las proezas de los maestros de ajedrez han sido atribuidas desde antiguo a potencias mentales casi mágicas. Magia que alcanza máximo esplendor en las llamadas "partidas a ciegas", donde no se permite que los jugadores vean el tablero. En 1894, el psicólogo francés Alfred Binet, coinventor del primer test de inteligencia, le pidió a maestros del ajedrez que explicasen cómo jugaban tales partidas. Binet supuso en un principio que los jugadores lograban hacerse una imagen mental, casi fotográfica, del tablero, pero no tardó en convencerse de que tal visualización era mucho más abstracta. En lugar de ver las crines del caballo o las vetas de la madera de la que está tallado, el maestro evoca solamente un conocimiento general de la ubicación de la pieza con respecto a otros elementos de la posición. Es el mismo tipo de conocimiento implícito que el viajero habitual del metro tiene de las paradas de su línea.

El maestro "cegado" complementa tal conocimiento con detalles de la partida en curso, así como con recuerdos de aspectos notables de partidas anteriores. Supongamos que no recuerde la posición exacta de un peón. Logrará recuperarla evocando la estrategia estereotipada de la apertura, una fase bien estudiada de las partidas en las que el número de opciones es bastante limitado. O bien puede hacer memoria de los razonamientos que le guiaron en jugadas anteriores: "No pude capturar su alfil hace dos jugadas; por consiguiente, ese peón tenía que estar cerrando el paso..." No necesita recordar cada detalle en todas las ocasiones; puede reconstruir cualquier pormenor que le interese deduciéndolo de un sistema de conexiones perfectamente organizado.

Como es obvio, si la posesión de un conocimiento tan intrincadamente estructurado ha de explicar no sólo el éxito en las partidas a ciegas, sino también otras facultades de los grandes maestros, como el cálculo y la planificación, habrá que inferir que la pericia en el juego no dependerá tanto de capacidades innatas cuanto de un entrenamiento especializado. El psicólogo holandés Adriaan de Groot, también gran maestro de ajedrez, confirmó esta idea en 1938, fecha en que pudo aprovechar la celebración en Holanda de un torneo internacional para comparar a jugadores de nivel medio y avanzado con los principales grandes maestros del mundo. Una de las cosas que hizo fue pedirles a los jugadores que describieran sus pensamientos mientras examinaban una posición tomada de una partida del torneo. Descubrió que, aunque los jugadores expertos —categoría inmediatamente inferior a la de maestro— analizaban muchas más posibilidades que los jugadores más débiles, la profundidad de los análisis apenas si crecía al ascender hasta los grados de maestro y gran maestro. Los mejores jugadores no se caracterizaban por examinar más posibilidades, sino por prestar atención sólo a las mejores. Lo mismo que decía Capablanca.

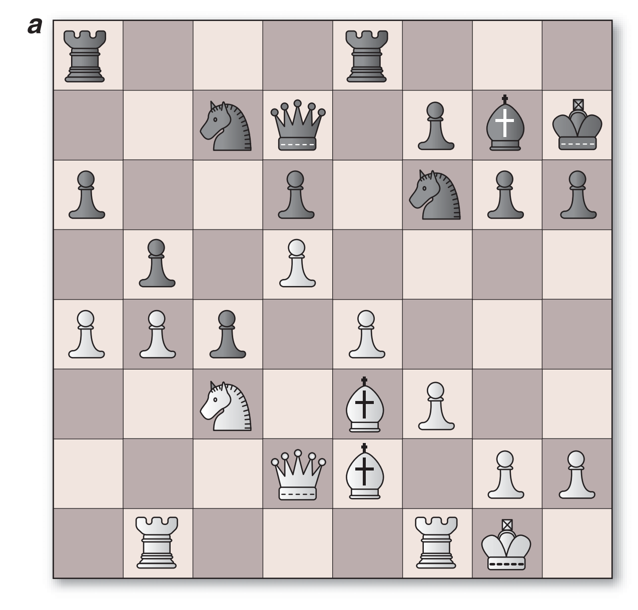
Resumen/Enseñanzas del ajedrez

- Debido a que la destreza ajedrecística es fácilmente medible y se presta a experimentos de laboratorio, este juego se ha convertido en importante banco de ensayos donde se prueban teorías de la ciencia cognitiva.
- Se han encontrado pruebas de que los grandes maestros recurren a un nutrido repertorio de posiciones. Se ha conjeturado que organizan la información en "tacos" de información que se recuperan de la memoria a largo plazo y se manipulan en la memoria operativa.
- Para acumular este cuerpo de conocimiento estructurado, los grandes maestros se aplican durante años a un "estudio esforzado": se enfrentan sin cesar a problemas que van algo más allá de su saber y competencia. Según parece, otro tanto hacen los mejores músicos, deportistas y matemáticos para aumentar su pericia, motivados por la competición y el gozo que proporciona la victoria.

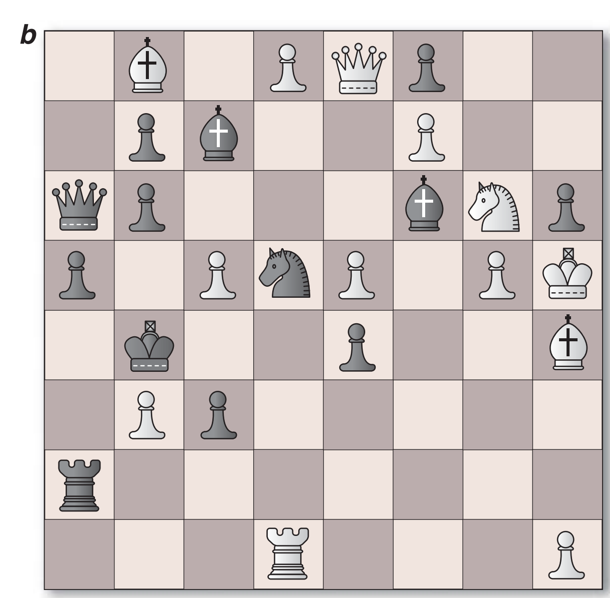
LA MEMORIA DE UN GRAN MAESTRO

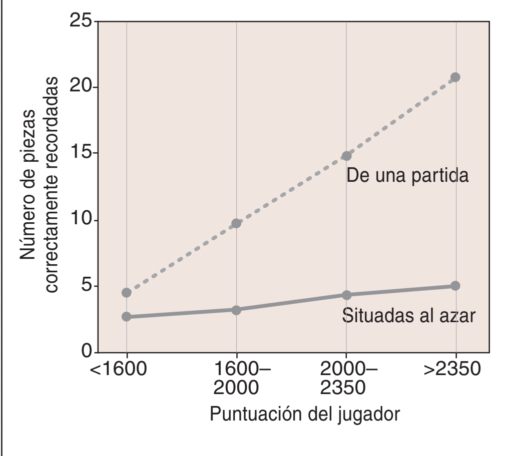
Los experimentos indican que la memoria de los maestros de ajedrez está sintonizada en las posiciones típicas del juego. En 13 estudios realizados entre 1973 y 1996, cuyos resultados compiló y reseñó un artículo de 1996, les fueron presentados a jugadores de diversa habilidad (*a*) tableros correspondientes a partidas reales y (*b*) tableros donde las piezas se habían colocado al azar. Tras haber observado las posiciones durante un máximo de 10 segundos, se les pidió a los jugadores que las reconstruyeran de memoria. Resultó (*gráfico al pie*) que los maestros (con puntuaciones de 2200 o mayores) y los grandes maestros (por lo general 2500 o más) superaban notablemente a los jugadores más débiles cuando las posiciones eran reales, pero sólo por un pequeño margen cuando eran aleatorias. Esta memoria a largo plazo, finamente sintonizada, parece crucial para la pericia ajedrecística.

a

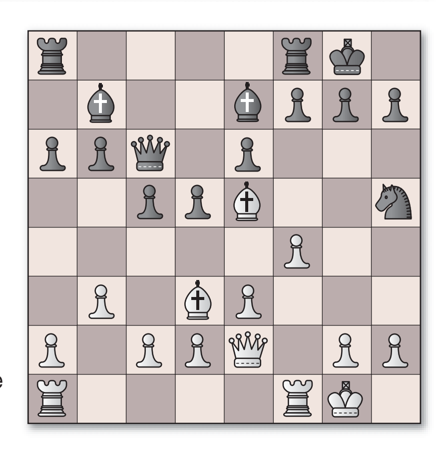


b





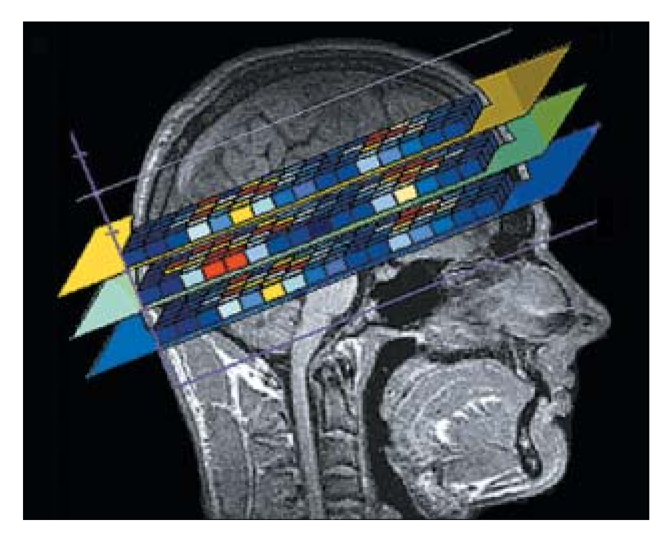
Un conocimiento estructurado de las posiciones del ajedrez faculta al gran maestro para localizar rápidamente la jugada correcta. El tablero de la derecha se ha tomado de una famosa partida entre Emanuel Lasker (*blancas*) y Johann Bauer (*negras*) celebrada en 1899. Aunque un jugador novel tendría que analizar muy a fondo la situación para acertar con la jugada que da la victoria a las blancas, un gran maestro se percataría enseguida. La jugada feliz puede verse en la figura 3.

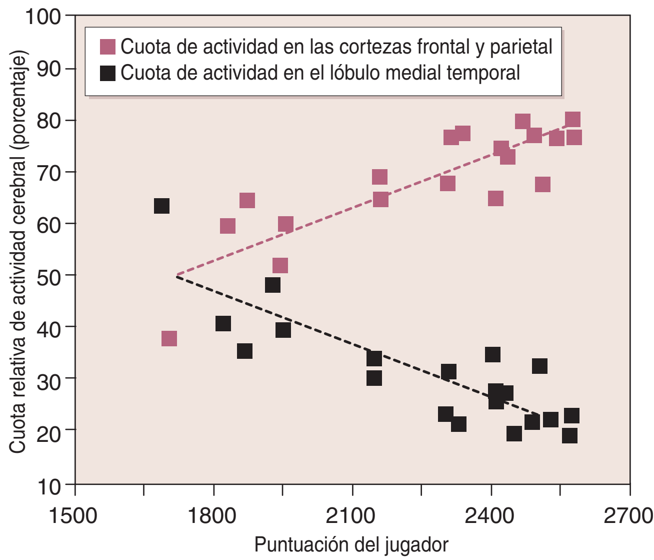


LUCY READING-IKKANDA; FUENTE: "CHUNKING MECHANISMS IN HUMAN LEARNING", POR FERNAND GOBET, PETER C. R. LANE, STEVE CROKER, PETER C.-H. CHENG, GARY JONES, IAIN OLIVER Y JULIAN M. PINE, EN *TRENDS IN COGNITIVE SCIENCES*, VOL. 5, N.º 6; JUNIO DE 2001

Investigaciones recientes han permitido comprobar que los hallazgos de De Groot eran en parte reflejo de la naturaleza de las posiciones que eligió para las pruebas. Una posición en la que resultase esencial un cálculo extenso y preciso daría pie a que los grandes maestros exhibieran sus dotes; indagarían más profundamente por la estructura ramificada de posibles jugadas de lo que un mero aficionado podría hacer. También los físicos experimentados pueden en ocasiones examinar más opciones que los estudiantes. Sin embargo, en ambos casos, el experto se funda menos en una potencia de análisis intrínsecamente superior que en un reservorio de conocimiento estructurado. Ante una situación difícil, un jugador más débil podría pasarse calculando media hora, examinando muchos casos por anticipado y, a pesar de ello, no elegir bien la jugada siguiente, mientras que el gran maestro aprecia la jugada debida casi en el acto, sin efectuar análisis conscientes.

De Groot impuso que sus sujetos examinasen una posición durante un tiempo limitado y que tratasen después de reconstruirla de memoria. La eficacia en la resolución de esta tarea revelaba la destreza del jugador en el intervalo que va desde el novel al gran maestro. Los principiantes apenas lograban recordar unos pocos detalles de la posición, a pesar de haber estado observándola durante 30 segundos, mientras que los grandes maestros solían reconstruirla con sólo una breve ojeada. Esta diferencia denota una determinada forma de memoria,





2. LOS PATRONES DE ACTIVIDAD CEREBRAL de los maestros de ajedrez son distintos de los observados en noveles. En un estudio de 2001 se observaron los cerebros de ajedrecistas que jugaban contra un ordenador. Se hizo mediante magnetoencefalografía, técnica que se basa en la medición de los campos magnéticos inducidos por las corrientes eléctricas del cerebro. En los jugadores menos diestros (*imagen superior*) se observó mayor actividad en el lóbulo medial temporal (*lado izquierdo de la sección tomográfica*) que en las cortezas frontal y parietal (*lado derecho*), lo que induce a pensar que analizaban jugadas nuevas con las que no estaban familiarizados. En los grandes maestros, sin embargo, las cortezas frontal y parietal mostraron mayor actividad; indicaba que estaban recuperando información de la memoria a largo plazo (*nube de puntos en el lado derecho del diagrama*).

específica del tipo de posiciones que se dan con frecuencia en las partidas. La memoria específica tiene que ser producto del entrenamiento; por una razón: los grandes maestros no logran mejores resultados que los demás en los tests generales de memoria.

Se han obtenido resultados similares con los jugadores de *bridge* (que recuerdan las cartas jugadas en muchas partidas), los programadores informáticos (que reconstruyen grandes masas de código) y los músicos (que evocan largos párrafos musicales). De hecho, tamaña capacidad de recordación para las materias de una determinada disciplina constituye una prueba típica de que el individuo es experto.

Que los expertos se basan mucho más en conocimientos adquiridos y estructurados que en análisis quedó ratificado en un estudio famoso. Se abordaba la trayectoria de un ajedrecista inicialmente flojo, identificado por las iniciales D. H., quien en el plazo de nueve años se alzó hasta la máxima categoría y en 1987 llegó a ser uno de los principales maestros canadienses. Neil Charness, profesor de psicología de la Universidad estatal de Florida, demostró que a pesar del enorme aumento de su capacidad ajedrecística, el jugador no efectuaba análisis más completos de las posiciones de las partidas que antes, sino que se apoyaba en un conocimiento muchísimo más amplio de las posiciones y de las estrategias.

Tacos de información

Hace unos 40 años, Herbert A. Simon y William Chase, ambos de la Universidad Carnegie-Mellon, se propusieron entender mejor la memoria de los expertos estudiando sus limitaciones. Partieron del punto en que De Groot había dejado sus trabajos y les pidieron a jugadores de variada destreza que reconstruyeran las posiciones de tableros "artificiales", cuyas piezas estaban colocadas al azar, en vez de partidas magistrales (*véase el recuadro* "La memoria de un gran maestro"). La correlación entre maestría ajedrecística y la precisión del recuerdo de los jugadores resultaba mucho menor cuando las posiciones eran aleatorias que cuando eran auténticas.

Se demostró así que la memoria ajedrecística era más específica todavía de lo que se pensaba. Se orientaba no meramente al juego en sí, sino a posiciones típicas de las partidas. Estos experimentos vinieron a corroborar estudios anteriores en los que se había demostrado convincentemente que la destreza en un área no tendía a transferirse a otras. El primero en señalar esa especificidad de la pericia fue, hace más de un siglo, Edward Thorndike, quien puso de manifiesto que el estudio del latín, por ejemplo, no mejoraba el dominio del inglés, y que las demostraciones geométricas no enseñan a utilizar la lógica en la vida cotidiana.

Para explicar la relativa debilidad de los maestros al reconstruir posiciones artificiales del tablero, Simon pergeñó un modelo cognoscitivo basado en la existencia de configuraciones dotadas de significado a las que llamó "tacos" (*chunks*). Con esta noción explicó cómo logran los maestros de ajedrez manipular ingentes cantidades de información almacenada, tarea que parecía desbordar por completo la memoria operativa. George Miller, de la Universidad de Princeton, evaluó los límites de la memoria operativa —la "pizarra" o "bloc de notas" de la memoria— en un artículo de 1956, hoy clásico, titulado "El número mágico siete, más o menos dos". Miller demostró que solamente somos capaces de tomar en cuenta entre cinco y nueve elementos de una vez. Al empaquetar informaciones jerarquizadas en tacos —sostenía Simon—, los maestros ajedrecistas podían obviar esta limitación, porque disponían de entre cinco y nueve tacos, en lugar del mismo número de detalles menores.

Pensemos en una canción infantil, como “El patio de mi casa no es particular”. El número de tacos de información de esta frase depende del conocimiento que se tenga de la canción y del idioma español. Para muchos hispanohablantes nativos, la frase forma parte de un taco mucho mayor, la canción popular. Para quien hable español, pero no conozca la canción, la frase constituye un taco autónomo e individual. Para quien haya aprendido de memoria las palabras, pero no su significado, la frase tiene 8 tacos de información, mientras que tendrá 30 para quien reconozca las letras, pero no las palabras.

Las mismas diferencias son observables en el contexto ajedrecístico entre jugadores noveles y grandes maestros. Para un principiante, una posición que tenga 20 piezas en el tablero puede contener mucho más de 20 tacos, pues las piezas pueden hallarse dispuestas de muchas formas. En cambio, un gran maestro puede ver parte de una posición como “un alfil en *fianchetto* en el enroque de rey” junto a “una cadena de peones bloqueada al estilo de la defensa india”, y por consiguiente puede comprimir todo el tablero en, tal vez, cinco o seis tacos. Midiendo el tiempo que se tarda en fijar en la memoria un taco nuevo y considerando el número de horas que ha de estudiar el jugador antes de alcanzar una gran maestría, Simon estimó que un gran maestro tiene acceso a una colección de entre 50.000 y 100.000 tacos de información ajedrecística. Un gran maestro puede recuperar de su memoria cualquiera de estos tacos con una mera ojeada al tablero, lo mismo que la mayoría de los hispanohablantes pueden entonar el resto de la canción infantil en cuanto oyen sus primeras palabras.

Pero aun así, la teoría de los tacos presentaba dificultades. No lograba explicar plenamente ciertos aspectos de la memoria; así, la capacidad de los expertos de ejecutar sus proezas mientras se les distraía (una de las tácticas favoritas en el estudio de la memoria). K. Anders Ericsson, de la Universidad estatal de Florida, y Charness adujeron que debería existir algún otro mecanismo que facultase a los expertos para utilizar la memoria a largo plazo como si fuese también un cuaderno de notas. Dice Ericsson: “La mera demostración de que los jugadores muy expertos pueden desenvolverse con capacidad casi plena cuando lo hacen a ciegas le resulta imposible de explicar a la teoría de los tacos de información, porque es necesario conocer la posición y después explorarla en la memoria”. Tal manipulación entraña la modificación de los tacos almacenados, en ciertos aspectos cuando menos, tarea que podríamos comparar con la de cantar “El patio de mi casa” hacia atrás. Es posible hacerlo, desde luego, pero no con facilidad, y no sin muchos errores y vueltas a empezar. A pesar de ello, las partidas de los grandes maestros jugadas a ciegas y deprisa suelen revestir una calidad extraordinaria.

Ericsson cita estudios sobre médicos, quienes guardan información en la memoria a largo plazo y la vuelven a sacar a luz en la formulación de un diagnóstico. No obstante, es posible que su ejemplo más familiar sea la lectura. Ericsson y Walter Kintsch, de la Universidad de Colorado, hallaron en un ensayo de 1995 que a los lectores avezados las interrupciones apenas les dificultaban el retorno al texto; al final sólo habían perdido unos cuantos segundos. Estos investigadores explicaron sus observaciones recurriendo a una estructura a la que llamaron “memoria operativa a largo plazo”, una denominación casi contradictoria, porque le asigna a la memoria a largo plazo lo único de lo que siempre se ha dicho que era incompatible con ella: la reflexión. Pero unas imágenes de la actividad cerebral tomadas en la Universidad de Constanza en 2001 respaldan tal teoría; revelan que los ajedrecistas expertos activan la memoria a largo plazo con frecuencia mucho mayor que los noveles (*véase la figura 2*).

Fernand Gobet, de la Universidad Brunel de Londres, es paladín de una teoría rival, que concibió con Simon a finales de los años noventa. Generaliza la noción de taco: recurre a tacos extensos y característicos que constan, tal vez, de una docena de piezas de ajedrez. Un “molde” así podría contar con cierto número de componentes libres que el maestro cubriría con un peón, un alfil u otra variable. Habría un molde correspondiente a la idea de “la posición de peón de dama aislado en la defensa nimzoíndia”. El maestro podría entonces cambiar un componente libre y reclasificar el molde como la posición anterior “menos los alfiles de las casillas negras”. Por recurrir nuevamente a la cancioncilla infantil, se trataría de algo así como memorizar una nueva letra construida a partir de “El patio de mi casa” cambiándole algunos componentes, que ahora se supondrían libres, por otros que guarden algún tipo de semejanza con los originales, por ejemplo “El labio de mi cara no es particular; cuando le pegan se rompe como los demás”. Quienes conozcan el molde original deberían ser capaces de memorizar en un instante la versión modificada.

Proliferación de prodigios

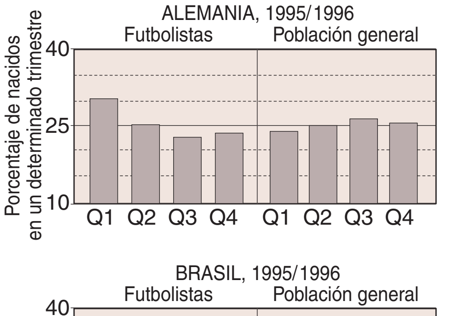
En lo único en que están de acuerdo todos los teóricos es en que la edificación de tales estructuras en la mente exige un enorme esfuerzo. Simon ha enunciado una ley psicológica, a la que llama “regla de los 10 años”, según la cual se requieren unos 10 años de intenso trabajo para lograr la maestría en una especialidad cualquiera. Incluso los niños prodigio —Gauss en las matemáticas, Mozart en la música y Bobby Fisher en ajedrez— debieron realizar un esfuerzo equivalente, si bien quizás empezaron antes y trabajaron con mayor ahínco que otros.

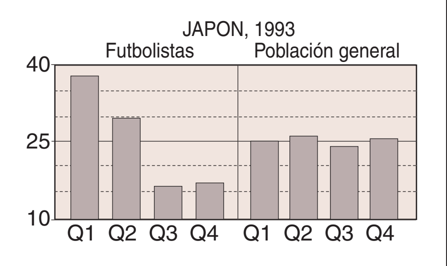
De acuerdo con esto, la proliferación de ajedrecistas muy precoces en los últimos años sería mero reflejo del advenimiento de métodos informáticos de aprendizaje, que permiten que los niños estudien muchas más partidas magistrales y se enfrenten, con mayor frecuencia que sus predecesores, a maestros, aunque sean informáticos. Fischer asombró cuando logró el título de gran maestro a los quince años. Fue en 1958. El récord lo ostenta actualmente un ucraniano, Sergey Karjarin, gran maestro a los 12 años y 7 meses.

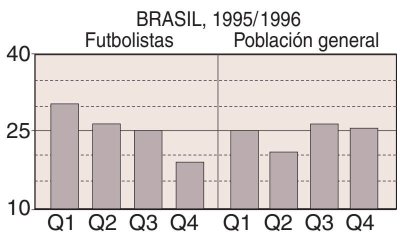
Ericsson sostiene que lo importante no es la experiencia *per se*, sino lo que llama “estudio esforzado”, que entraña afrontar sin cesar dificultades que superan la propia competencia. Esa es la razón de que haya entusiastas que dedican decenas de miles de horas a jugar al golf, al ajedrez o a tocar un instrumento musical sin rebasar jamás el nivel de aficionado, y de que un aprendiz debidamente entrenado pueda superarles en un tiempo no

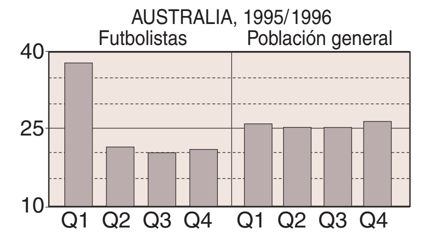
DEL ENTRENAMIENTO NACE EL TALENTO

De un estudio de 1999 sobre los jugadores profesionales de fútbol se infiere que su éxito obedecería al entrenamiento más que al talento. En Alemania, Brasil, Japón y Australia, era mucho más probable que los jugadores profesionales hubieran nacido en el primer trimestre (T1) posterior a la fecha de cierre de las ligas juveniles que en los otros tres (*diagramas de la derecha*). Dado que estos jugadores eran casi un año mayores que sus compañeros cuando se incorporaron a las ligas, debieron de contar con la ventaja de un vigor y una agilidad mayores; ello les daría mayor posesión del balón y más ocasiones de marcar. Sus éxitos de aquellos primeros años pudieron motivarles para seguir mejorando, lo que explicaría su presencia desproporcionada en las ligas profesionales. Una intensa motivación y preparación podría explicar también las proezas de los niños prodigio, como Wolfgang Amadeus Mozart (*a la izquierda*) o el golfista Tiger Woods (*a la derecha*).



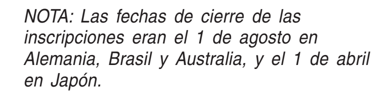











NOTA: Las fechas de cierre de las inscripciones eran el 1 de agosto en Alemania, Brasil y Australia, y el 1 de abril en Japón.

muy largo. Interesa señalar que el tiempo dedicado a jugar al ajedrez, incluso en torneos, parece contribuir menos al progreso del jugador que el estudio esforzado; el principal valor formativo de tales confrontaciones es la detección de puntos flacos, para analizarlos después.

Los noveles se implican al principio en el estudio esforzado; por eso suelen progresar rápidamente en el golf o la conducción de automóviles. Pero una vez que han logrado resultados aceptables —estar a la altura de sus amigos o conseguir el permiso de conducción—, casi todos aflojan en su esfuerzo. Su actuación se vuelve automática y, por consiguiente, no progresa. En cambio, los expertos que siguen formándose mantienen abierta la rendija de su "buzón mental", lo que les permite inspeccionar, criticar y aumentar su contenido y, en consecuencia, aproximarse a las pautas marcadas por los líderes de su especialidad.

Entretanto, los criterios para la determinación de la maestría se están volviendo cada vez más rigurosos. Hay estudiantes de bachillerato que corren la milla en cuatro minutos y alumnos de conservatorio que interpretan piezas con las que en otros tiempos sólo se atrevían los virtuosos. Aun así, vuelve a ser en ajedrez donde más convincente resultan las comparaciones a lo largo del tiempo. John Nunn, matemático británico y gran maestro de ajedrez, utilizó recientemente un ordenador para comparar los errores que se cometieron en las partidas de dos torneos internacionales celebrados en 1911 y en 1993. Los jugadores modernos actuaron con una precisión mucho mayor. Nunn examinó después las partidas de un jugador que en 1911 quedó en la mitad de la clasificación; llegó a la conclusión de que su puntuación no pasaría hoy de 2100, centenares de puntos por debajo del grado de gran maestro, "y eso en un buen día y con viento a favor". Los maestros eximios de entonces eran considerablemente mejores, aunque bastante inferiores a los jugadores más destacados de hoy.

Pero, como decíamos, ni Capablanca ni sus coetáneos disponían de ordenadores ni de bancos de datos de partidas magistrales. Tenían que resolver los problemas por sí mismos, al igual que Bach, Mozart o Beethoven. Aunque hubiesen quedado por debajo de los maestros actuales en cuanto a técnica de juego, siguen sobresaliendo por su capacidad creadora. La misma comparación podría hacerse entre Newton y un físico de hoy recién doctorado.

La fe en la importancia del talento innato, quizá más acusada entre los propios expertos y sus preparadores, carece de pruebas sólidas que la sustancien. Gobet dirigió en 2002 un estudio de jugadores británicos de ajedrez, desde el nivel de aficionado hasta el de gran maestro, sin hallar conexión alguna entre su fortaleza como jugadores y sus facultades visoespaciales medidas con

LUCY READING-IKKANDA; FUENTE: "THE RELATIVE AGE EFFECT IN SOCCER", POR JOCHEN MUSCH Y ROY HAY, EN *SOCIOLOGY OF SPORT JOURNAL*, VOL. 16; 1999 (*gráficas*); MUSEO MOZART, SALZBURG, AUSTRIA/BRIDGEMAN ART LIBRARY (*Mozart*); ALAN LEVENSON *Corbis* (*Woods*)

tests de memorización de formas. Otros investigadores han observado que la capacidad de los pronosticadores profesionales de las carreras de caballos no tiene correlación alguna con sus dotes matemáticas.

Aunque todavía no se puede predecir quién llegará a gran experto en su especialidad, un notable experimento ha demostrado la posibilidad de crearlo deliberadamente. László Pólgár, educador húngaro, adiestró a sus tres hijas en el ajedrez. Las hacía practicar seis horas diarias. Hoy, una de ellas es maestra internacional, y las otras dos, grandes maestras. Nunca ha habido unos hermanos tan competentes ajedrecísticamente. La menor de las hermanas, Judit, que ahora tiene 30 años, ocupaba en la lista de julio de 2006 el puesto 17 de la clasificación mundial; hace unos años llegó al décimo puesto.

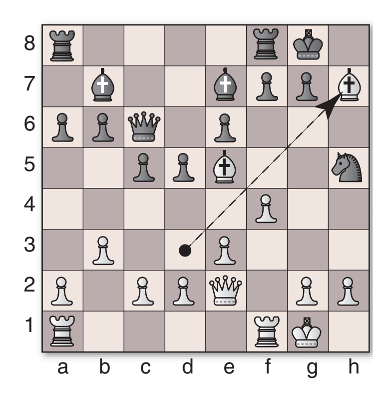
El experimento de Pólgár ha demostrado dos cosas: que es posible formar grandes maestros del ajedrez y que las mujeres pueden llegar a serlo. No es casualidad que el número de grandes ajedrecistas precoces se haya multiplicado desde que Pólgár publicó un libro sobre la educación ajedrecística. El número de niños prodigio musicales experimentó un incremento similar cuando Leopold Mozart hizo algo parecido con su hijo dos siglos antes.

Para alcanzar destreza o convertirse en experto parece que la motivación cuenta más que la capacidad innata. En la música, los deportes, el ajedrez y otros juegos, dominios todos ellos en los que la habilidad del sujeto se define mediante competiciones y no por credenciales académicas, se está llegando al profesionalismo a edades cada vez más tempranas, bajo la tutela y promoción de padres dedicados a ello, e incluso de familias enteras.

Además, el éxito se cimienta en otros éxitos, porque cada logro puede reforzar la motivación del niño. Un estudio sobre los jugadores profesionales de fútbol, realizado en varios países en 1999, descubrió que tenían mayor probabilidad que la población general de haber nacido en una época del año que hiciera que ingresasen en las ligas juveniles de fútbol a una edad mayor que la media (*véase el recuadro* "Del entrenamiento nace el talento"). En sus años más jóvenes, estos niños habrían contado con una sustancial ventaja sobre sus compañeros de equipo al jugar al fútbol, por ser de mayor corpulencia y fuerza. Dado que los niños más ágiles y fuertes tendrán más probabilidades de tocar el balón, marcarán goles con más frecuencia, y su éxito en el juego les motivará para mejorar todavía más.

En la enseñanza de deportes, de música y de otras materias se tiende a admitir que el talento es importante; se cree también que es posible reconocerlo enseguida. Más bien parece que se está confundiendo capacidad con precocidad. Normalmente no hay forma de saber, escuchando un solo recital, si la extraordinaria ejecución de un joven violinista es fruto de una capacidad innata o de años de sometimiento al método Suzuki. Capablanca, que es tenido hasta el día de hoy por el primero de entre los ajedrecistas "naturales", se jactaba de que nunca había estudiado el juego. Pero lo cierto es que Capablanca suspendió en la Universidad de Columbia y tuvo que abandonarla debido, en parte, al muchísimo tiempo que dedicaba al ajedrez. Su célebre rapidez de captación era producto de toda esa preparación, no su sustituto.

LUCY READING-IKKANDA



3. LA JUGADA que da la victoria a las blancas es la siguiente: alfil toma el peón de la casilla h7; el rey negro captura el alfil y la reina blanca al caballo negro en h5, con jaque, lo que obliga al rey negro a regresar a g8; entonces el otro alfil blanco captura al peón de g7, donde lo come el rey negro. Este doble sacrificio de los alfiles despeja el camino para un ataque por dama y torre, y obliga a las negras a sacrificar su dama para evitar el mate. Emanuel Lasker, que fue el ganador de la partida, llegó a campeón del mundo en 1894, título que conservó durante 27 años; le sucedió José Raúl Capablanca.

Las pruebas de que dispone la psicología indican que los expertos no nacen, se hacen. Más todavía: la probada posibilidad de convertir rápidamente a un niño en un experto —en ajedrez, en música y en otros muchos campos— le plantea un claro reto al sistema educativo. ¿Será posible hallar la forma de incitar a los escolares al "estudio esforzado" que mejoraría su destreza lingüística y aritmética? Roland G. Fryer, economista de Harvard, ha propuesto que se ofrezcan recompensas monetarias para motivar a los estudiantes de algunas escuelas de Nueva York y Dallas con mucho fracaso escolar. En un programa actualmente en marcha en Nueva York, los maestros evalúan a los alumnos cada tres semanas y recompensan con pequeñas sumas, del orden de 10 a 20 dólares, a quienes logran calificaciones altas. Los primeros resultados parecen prometedores. En lugar de estar perpetuamente preguntándose "¿por qué no sabe leer el niño?", tal vez sea llegado el momento de decirse "¿por qué ha de haber algo que no pueda aprender?"

El autor

Philip E. Ross, colaborador habitual de *Investigación y Ciencia*, es también jugador de ajedrez y padre de Laura Ross, ajedrecista con grado de maestro, que le aventaja en 199 puntos.

Bibliografía complementaria

THE RATING OF CHESSPLAYERS, PAST AND PRESENT. Arpad E. Elo. Arco Publishing, 1978.

THOUGHT AND CHOICE IN CHESS. Adriaan de Groot. Mouton de Gruyter, 1978.

EXPERT PERFORMANCE IN SPORTS: ADVANCES IN RESEARCH ON SPORT EXPERTISE. Compilación de Janet L. Starkes y K. Anders Ericsson. Human Kinetics, 2003.

MOVES IN MIND: THE PSYCHOLOGY OF BOARD GAMES. Fernand Gobet, Alex de Voogt y Jean Retchitzki. Psychology Press, 2004.

THE CAMBRIGDE HANDBOOK OF EXPERTISE AND EXPERT PERFORMANCE. Compilación de K. Anders Ericsson, Paul J. Feltovich, Robert R. Hoffman y Neil Charness. Cambridge University Press, 2006.

Lectinas



Encargadas de descifrar los códigos relativos a los glúcidos, estas proteínas se caracterizan por su exquisita selectividad, lo que las convierte en valiosas herramientas bioquímicas

Francisca Gallego del Sol, Celso S. Nagano, Benildo S. Cavada, Alexandre H. Sampaio, Libia Sanz y Juan José Calvete

En 1888, Hermann Stillmark describió la existencia, en extractos de semillas de ricino (*Ricinus communis*), de una proteína que aglutinaba glóbulos rojos. Se trataba de la ricina. Este hallazgo representó un hito para la biología. Demostraba que la toxicidad de las semillas se debía a la presencia de un factor proteico aglutinante de eritrocitos. Más tarde se describieron proteínas similares en semillas y cortezas de otras euforbiáceas (*Croton tiglium*) y leguminosas (*Abrus precatorius* y *Robinia pseudoacacia*).

M. Elfstand introdujo, en 1898, el término hemaglutininas (en alemán, *Blutkörperchenagglutinin*) para designar a este grupo de proteínas citotóxicas y hemoaglutinantes. Sin embargo, la idea inicial de que la toxicidad constituía una propiedad intrínseca de las hemoaglutininas tuvo que abandonarse en 1907, cuando K. Landsteiner y H. Raubitschek caracterizaron hemaglutininas inocuas en semillas de alubia (*Phaseolus vulgaris*), guisante (*Pisum sativum*) y lenteja (*Lens culinaris*).

Llegamos a 1936, cuando J. B. Sumner y S. F. Howell establecieron que la hemaglutinación causada por la concanavalina A (ConA) aislada de semillas de *Canavalia ensiformis* podía inhibirse mediante la sacarosa, o azúcar de caña. El hallazgo se corroboró en numerosos estudios. Y se evidenció que la hemaglutinación resultaba de la unión específica de ConA con azúcares de la superficie de glóbulos rojos vecinos.

Entre 1948 y 1949, K. O. Renkonen, y de forma independiente W. C. Boyd y R. M. Reguera, demostraron que algunas hemaglutininas de leguminosa aglutinaban preferentemente eritrocitos humanos de determinados grupos sanguíneos del sistema AB0. El descubrimiento de esta selectividad motivó la adopción del término "lectina" (del latín "legere", escoger) para designar a las hemaglutininas.

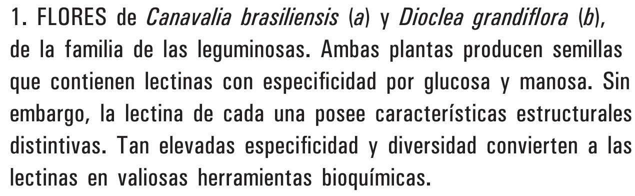
Desde los años cincuenta hasta nuestros días, se han venido identificando cientos de lectinas, de origen no inmunitario y ubicuas en toda la escala evolutiva (virus, microorganismos, plantas, hongos y animales). En su mayoría, estas proteínas privadas de actividad enzimática no aglutinan glóbulos rojos. Presentan, entre otros caracteres comunes, un dominio de reconocimiento de azúcares, al menos.

Códigos relativos a los glúcidos

Las interacciones moleculares basadas en el reconocimiento específico entre lectinas y glicanos (azúcares de la membrana celular) cumplen un papel clave en múltiples procesos biológicos. Ello se debe, en parte, al enorme potencial codificador de información de las estructuras de los glicanos, superior al de proteínas, ácidos nucleicos y otras macromoléculas.







1. FLORES de *Canavalia brasiliensis* (*a*) y *Dioclea grandiflora* (*b*), de la familia de las leguminosas. Ambas plantas producen semillas que contienen lectinas con especificidad por glucosa y manosa. Sin embargo, la lectina de cada una posee características estructurales distintivas. Tan elevadas especificidad y diversidad convierten a las lectinas en valiosas herramientas bioquímicas.

FRANCISCA GALLEGO DEL SOL, CELSO S. NAGANO, BENILDO S. CAVADA, ALEXANDRE H. SAMPAIO, LIBIA SANZ Y JUAN JOSE CALVETE

Las unidades estructurales de los carbohidratos —monosacáridos o azúcares sencillos— pueden engarzarse entre sí en varios puntos y de varias formas, si tenemos en cuenta la isomería α/β. Los aminoácidos de las proteínas y los nucleótidos de los ácidos nucleicos se limitan, en cambio, a generar estructuras lineales, lo que restringe su diversidad. Merced a tamaña capacidad de crear un repertorio amplio de isómeros a partir de unos pocos azúcares sencillos, los polisacáridos constituyen las moléculas de reconocimiento por excelencia.

El potencial informativo codificado en la estructura de los polisacáridos (lo que ha dado en llamarse *glicocódigos*) se descifra en la unión selectiva de lectinas a glicanos. Los polisacáridos gozan de una amplia distribución en sistemas unicelulares y organismos pluricelulares. Se encuentran en forma libre o unidos (por enlace covalente) a proteínas y lípidos de la membrana celular, a proteínas de la matriz extracelular, a proteínas de los fluidos biológicos y otras.

La estructura de los glicanos de glicoproteínas y glicolípidos celulares experimenta cambios, regulados por glicosidasas y glicosiltransferasas específicas, durante la diferenciación, el desarrollo y el crecimiento de un organismo. La expresión de glicocódigos, controlada en el espacio y en el tiempo, constituye, pues, un elemento clave del plan de desarrollo de un organismo, de su morfogénesis.

Amén de modificar las propiedades fisicoquímicas de las macromoléculas con las que están conjugados, los carbohidratos resultan esenciales para el normal funcionamiento de los organismos adultos.

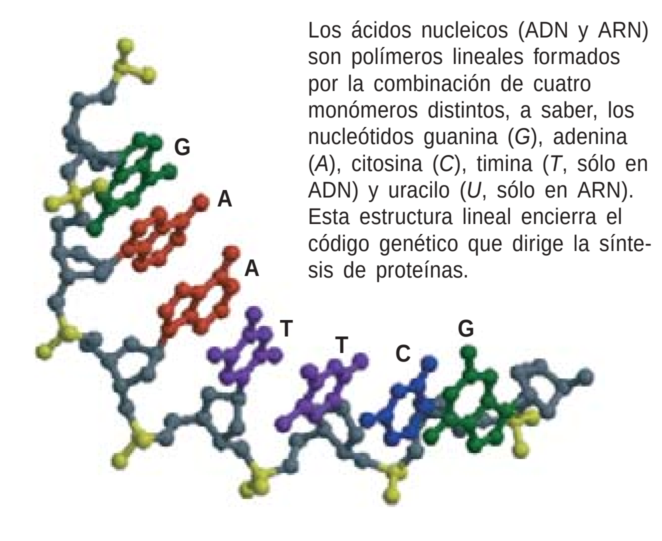
Lectinas, glicobiología y glicopatología

La ubicuidad de las lectinas refleja su participación decisiva en actividades celulares muy diversas. Operan en numerosos procesos intracelulares e intercelulares, lo mismo fisiológicos que patológicos. Ejemplos de los primeros son el reconocimiento de espermatozoide y óvulo durante la fecundación, adhesión entre células y célula-matriz extracelular en la embriogénesis y el desarrollo, diferenciación y proliferación celular, recambio de proteínas plasmáticas por el receptor hepático de asialoglicoproteínas y otros.

Son procesos patológicos donde intervienen lectinas la unión de bacterias, virus y toxinas a la superficie celular, inflamación, transformación maligna y metástasis, entre otros.

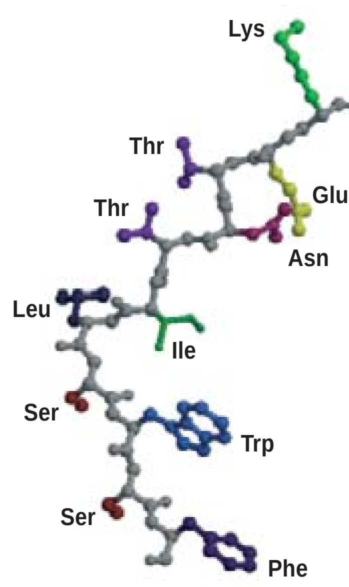
Existe una larga lista de trabajos experimentales que demuestran la correlación entre el aumento de la expresión de lectinas intracelulares de la familia de las galectinas y el desarrollo de inflamación y cáncer en modelos animales. Se han descrito numerosas patologías relacionadas

ACIDOS NUCLEICOS: Cadenas de nucleótidos



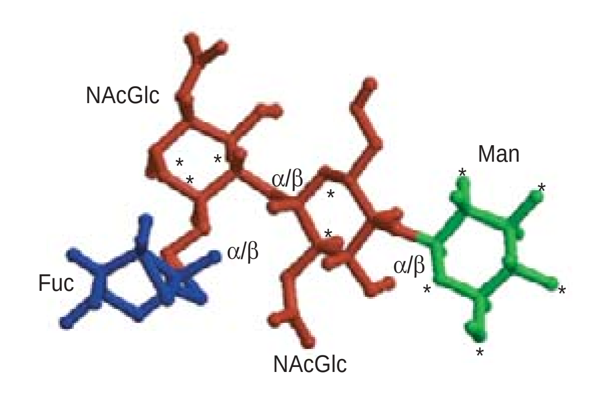
Los ácidos nucleicos (ADN y ARN) son polímeros lineales formados por la combinación de cuatro monómeros distintos, a saber, los nucleótidos guanina (*G*), adenina (*A*), citosina (*C*), timina (*T*, sólo en ADN) y uracilo (*U*, sólo en ARN). Esta estructura lineal encierra el código genético que dirige la síntesis de proteínas.

PROTEINAS: Cadenas plegadas de aminoácidos



Las proteínas, polímeros lineales plegados, constan de hasta 20 aminoácidos distintos. En la figura aparecen algunos de ellos: lisina (*Lys*), treonina (*Thr*), leucina (*Leu*), serina (*Ser*), tirosina (*Tyr*), glutámico (*Glu*), asparragina (*Asn*), isoleucina (*Ile*), triptófano (*Trp*) y fenilalanina (*Phe*). El plegamiento tridimensional de las proteínas corresponde a un nivel superior de codificación de la información biológica. La modificación subsiguiente a la traducción por glicosilación contribuye a su variabilidad estructural y, por tanto, a su potencial codificador.

CARBOHIDRATOS: Estructuras ramificadas de monosacáridos



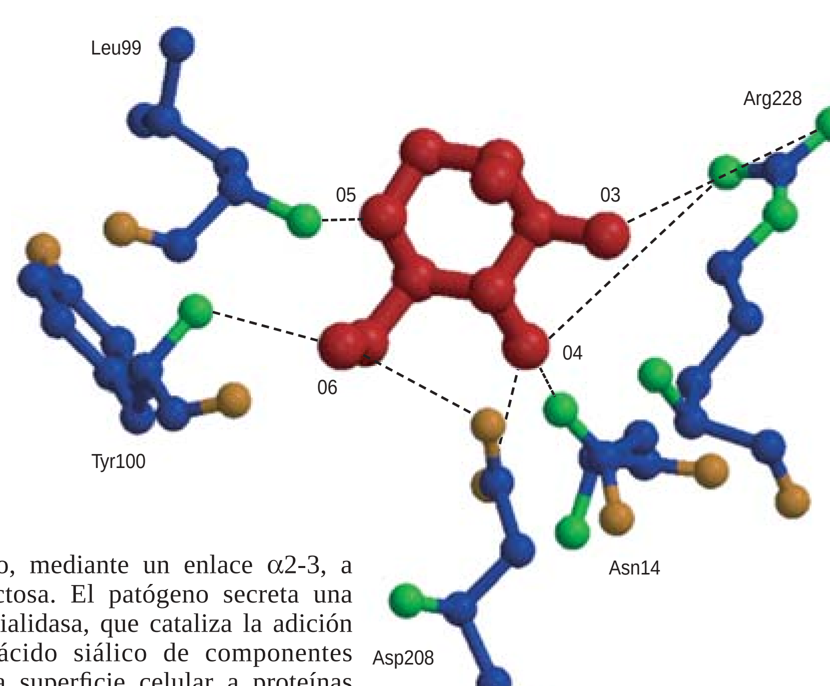
Los carbohidratos, estructuras ramificadas, se forman con la combinación de monosacáridos o azúcares sencillos.
En la figura aparecen la manosa (*Man*), la N-acetil-glucosamina (*NAcGlc*) y la fucosa (*Fuc*).
Las ramificaciones (*asteriscos*) confieren a la estructura una notable capacidad de almacenar información biológica: la variabilidad se presenta no sólo en los monómeros sino, sobre todo, en la posición de los enlaces que unen los distintos azúcares (enlaces glicosídicos) y en la configuración (α o β) de dichos enlaces.

COMPARACION

Carbohidratos, ácidos nucleicos y proteínas portan información biológica escrita en sus estructuras. De entre ellos, los carbohidratos ofrecen una mayor capacidad para el transporte de información. La razón estriba en la diversidad de conformaciones de las estructuras ramificadas. Para cuantificar esta información biológica codificada en una macromolécula basta con calcular el número de estructuras que pueden formarse con los elementos (monómeros) que la componen (*tabla*).

	ACIDOS NUCLEICOS	PROTEINAS	CARBOHIDRATOS
Monómeros disponibles	4 nucleótidos	20 aminoácidos	8 monosacáridos
Los monómeros se unen para formar...	Cadenas lineales	Cadenas plegadas	Estructuras ramificadas
¿Cuántas estructuras de 10 monómeros pueden generarse?	1,04 10^{6}	1,28 10^{13}	1,34 10^{18}

2. DETALLE DE LA UNION DE MANOSA A CONCANAVALINA A, la lectina de semillas de *Canavalia ensiformis*. Muestra las interacciones químicas entre grupos hidroxilo del azúcar y los aminoácidos del sitio de reconocimiento de monosacáridos de la lectina (aminoácidos de cuatro bucles no consecutivos). Este tipo de interacciones (puentes de hidrógeno, fuerzas de van der Waals, etcétera) se observan con frecuencia en otros complejos lectina-carbohidrato.



con alteraciones en el procesamiento de los glicanos asociados a glicolípidos: leucodistrofia metacromática, gangliosidosis GM1, enfermedades de Farber, Fabry, Krabbe, Gaucher, Tay-Sachs, y de Sandhoff, neuropatías autoinmunes y síndrome de Guillain-Barré. O con la asociación de glicanos a glicoproteínas celulares.

La fibrosis quística está causada por mutaciones en el gen que codifica un canal de cloruro. Las mutaciones no sólo repercuten en el transporte del ion a través de la membrana plasmática, sino que producen también alteraciones en el patrón de N-glicosilación celular: incremento de fucosilación y del porcentaje de estructuras sialil-Le^x y SO_4-Le^x en las mucinas salivales y del tracto respiratorio. El patógeno oportunista *Pseudomonas aeruginosa* sintetiza lectinas que unen D-galactosa y L-fucosa; las utiliza para colonizar el tejido pulmonar.

Numerosos agentes patógenos se sirven de glicanos para el anclaje en la superficie celular que precede a la infección: *Plasmodium falciparum* (causante de la malaria), parásitos del género *Leishmania* (responsables de la leismaniasis), *Entameba histolytica* (causante de la amebiasis), *Helicobacter pylori*, *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parrum* (responsables de trastornos gastrointestinales), *Streptococcus pneumoniae* o *Trypanosoma cruzi* (protozoo causante de la enfermedad de Chagas, que se transmite a través del insecto *Triatoma infestans* y en la actualidad infecta a 24 millones de personas en Iberoamérica).

Especial interés reviste el mecanismo de infección aplicado por *Trypanosoma cruzi*. Este protozoo se adhiere a la membrana celular a través de una lectina que reconoce ácido siálico unido, mediante un enlace α2-3, a galactosa. El patógeno secreta una transialidasa, que cataliza la adición del ácido siálico de componentes de la superficie celular a proteínas propias, asegurándose así puntos de anclaje para la infección.

Un conocimiento detallado de las bases moleculares de las interacciones entre lectinas y glicanos resulta, pues, necesario para abordar los procesos biológicos y patológicos en que éstas participan.

Evolución convergente

Nos hallamos lejos de conocer la función biológica de gran parte de los cientos de lectinas identificadas en virus, bacterias, hongos, plantas y animales. No obstante, la investigación basada en difracción de rayos X de la estructura de numerosas lectinas y de complejos lectina-glicano ha demostrado que el reconocimiento específico de azúcares surgió en el curso de la evolución de forma independiente en módulos estructurales muy dispares. Se trata, pues, de una evolución convergente.

Las lectinas presentan, a su vez, una gran variabilidad estructural. Bastan pequeñas variaciones en la composición de aminoácidos —en particular del lugar de unión a carbohidratos— para que las lectinas con un mismo plegamiento polipeptídico posean distintas especificidades de unión a glicanos. Además, el dominio de reconocimiento de carbohidratos acostumbra formar parte de estructuras modulares u oligoméricas complejas. Así, un mismo dominio de unión a azúcares puede presentar diferente estequiometría y orientación espacial en distintas lectinas multiméricas, lo que incrementa su variabilidad estructural. El estado oligomérico de las lectinas y las consiguientes interacciones multivalentes con sus ligandos modulan la selectividad y la afinidad de la unión entre lectinas y polisacáridos.

Lectinas animales

Ciñámonos al caso de lectinas animales de tipo C que poseen el mismo dominio de unión a carbohidratos en distintas estructuras modulares. La selectina E, por ejemplo, corresponde a una lectina de la membrana de células vasculares endoteliales. Inducida por mediadores de inflamación, se une a carbohidratos de la superficie de neutrófilos y monocitos circulantes que contienen el antígeno sialil-$Lewis^x$ para mediar en la adhesión y primeras etapas de la extravasación de leucocitos en sitios de inflamación.

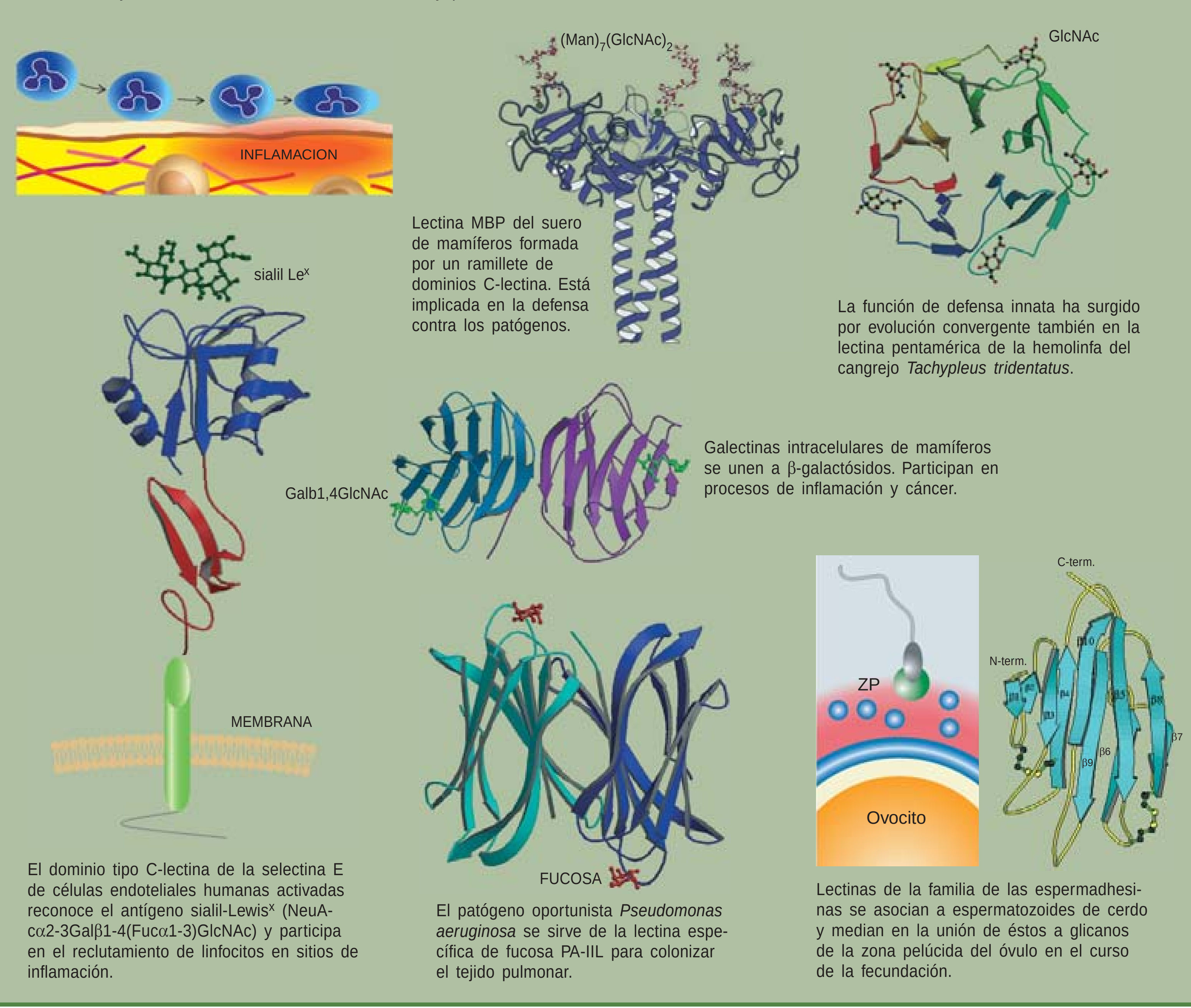
La lectina de unión a manosa (MBP, de “mannose-binding protein”) circula en el plasma sanguíneo de mamíferos; participa en el sistema de defensa. La estructura en ramillete de la MBP resulta idónea para la unión a estructuras ricas en manosa presentes en la superficie de bacterias y hongos; así neutraliza la infección. Se ha propuesto que las

FRANCISCA GALLEGO DEL SOL, CELSO S. NAGANO, BENILDO S. CAVADA, ALEXANDRE H. SAMPAIO, LIBIA SANZ Y JUAN JOSE CALVETE

LECTINAS ANIMALES

El estado oligomérico de las lectinas y las consiguientes interacciones multivalentes con sus ligandos modulan la selectividad y la afinidad de la unión entre lectinas y polisacáridos.

Aquí se muestran algunos de los dominios de unión a carbohidratos, así como la disposición espacial de algunos lugares de unión a azúcares.



Lectina MBP del suero de mamíferos formada por un ramillete de dominios C-lectina. Está implicada en la defensa contra los patógenos.

La función de defensa innata ha surgido por evolución convergente también en la lectina pentamérica de la hemolinfa del cangrejo *Tachypleus tridentatus*.

Galectinas intracelulares de mamíferos se unen a β-galactósidos. Participan en procesos de inflamación y cáncer.

El dominio tipo C-lectina de la selectina E de células endoteliales humanas activadas reconoce el antígeno sialil-Lewis^{x} (NeuAcα2-3Galβ1-4(Fucα1-3)GlcNAc) y participa en el reclutamiento de linfocitos en sitios de inflamación.

El patógeno oportunista *Pseudomonas aeruginosa* se sirve de la lectina específica de fucosa PA-IIL para colonizar el tejido pulmonar.

Lectinas de la familia de las espermadhesinas se asocian a espermatozoides de cerdo y median en la unión de éstos a glicanos de la zona pelúcida del óvulo en el curso de la fecundación.

MBP constituyen un sistema de defensa primitivo, de aparición anterior al sistema inmunitario.

A este respecto cabe destacar que el sistema de defensa del artrópodo *Tachypleus tridentatus* se basa en la acción de taquilectinas secretadas a la hemolinfa por la desgranulación de hemocitos, inducida por el contacto con el patógeno. Las taquilectinas reconocen estructuras de glicanos esenciales para la infección microbiana. Lo mismo que las MBP y otras lectinas de vertebrados implicadas en mecanismos de defensa innatos (por ejemplo, pentraxinas), las taquilectinas presentan una estructura pentamérica en donde los sitios de unión a carbohidratos distan unos de otros. Parece ser que la multivalencia de unión resultante de la orientación extendida de sitios de reconocimiento de azúcares privilegia la neutralización de infecciones microbianas.

Lectinas vegetales

Las lectinas vegetales se descubrieron decenios antes que las lectinas animales. Pese a ello, se desconoce

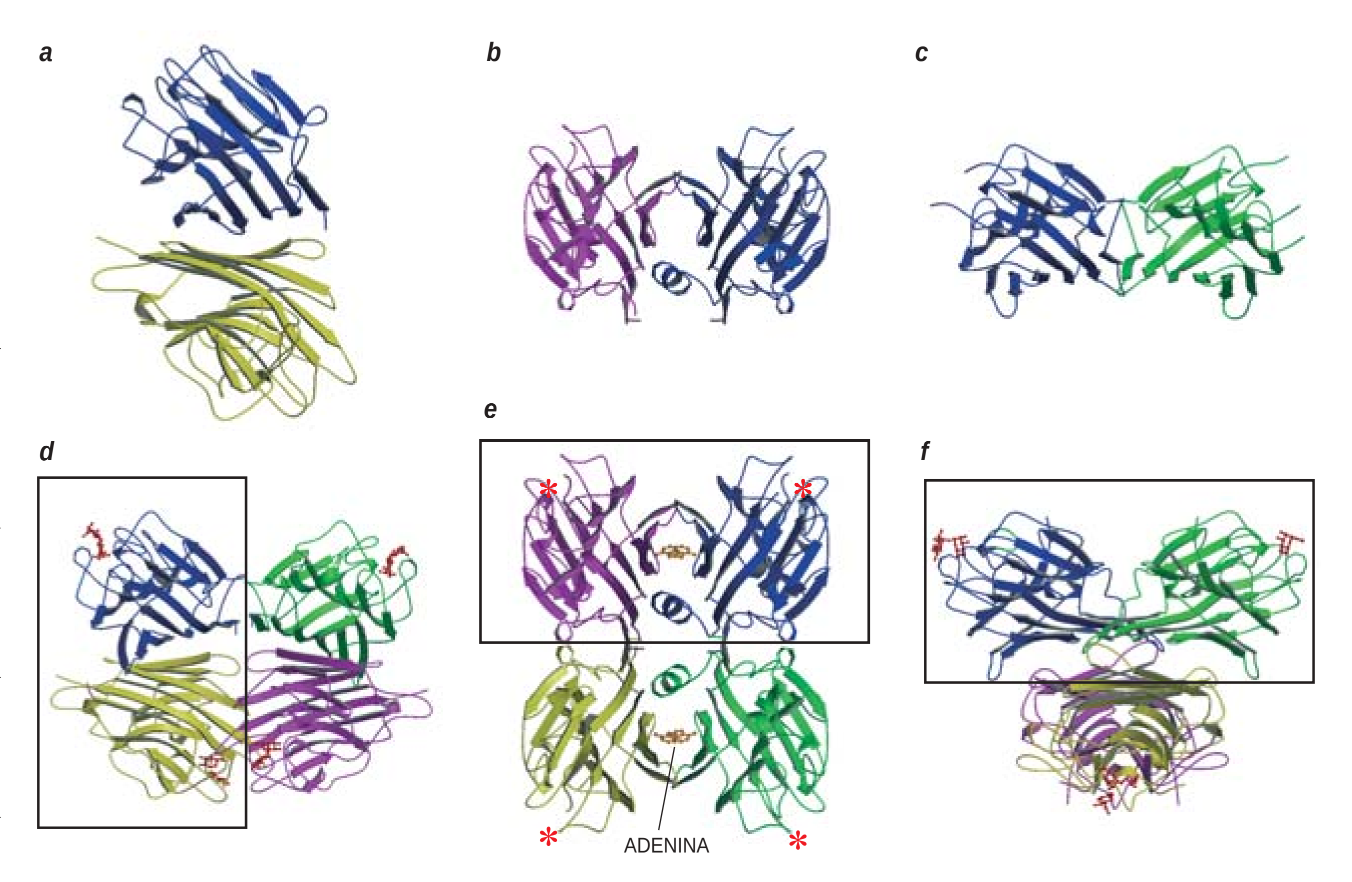
la función biológica exacta de las vegetales. La presencia de lectinas en raíces asociadas a lugares de nodulación de bacterias fijadoras de nitrógeno sugiere, por un lado, una función simbiótica. Mas, por otro, existen indicios de la toxicidad de algunas lectinas para determinados insectos fitófagos. Sin olvidar que numerosas lectinas vegetales reconocen estructuras de carbohidratos poco frecuentes en plantas, pero abundantes en microorganismos (por ejemplo, la polimanosa). Cumplirían, pues, una función defensiva ante los patógenos.

Merced a su exquisita especificidad y fácil purificación para estudios histoquímicos, bioquímicos, biofísicos y estructurales, las lectinas vegetales se consideran herramientas idóneas para el estudio estructural de la especificidad de unión de carbohidratos a proteínas. Pensemos en las lectinas de las semillas de la leguminosa *Vicia villosa* y de la labiada *Salvia sclarea*. Estas dos lectinas reconocen selectivamente a Tn [N-acetilgalactosamina-O-(serina/treonina)], un antígeno que se esconde en la estructura de los glicanos de las O-glicoproteínas de la membrana plasmática de células humanas normales, pero que se encuentra expuesto en la superficie celular del 90 por ciento de los carcinomas humanos, a consecuencia de una deficiencia de la actividad de una enzima glucosiltransferasa. La elevada especificidad por este marcador de carcinomas hace que las lectinas en cuestión sean herramientas bioquímicas útiles para la detección precoz de tumores humanos.

La mayoría de las lectinas vegetales conocidas se agrupan en cuatro grandes familias de proteínas, que guardan parentesco estructural y evolutivo. Son las lectinas de leguminosas, lectinas que unen quitina, toxinas que inactivan al ribosoma (RIP, de "ribose-inactivating proteins") y lectinas de monocotiledóneas específicas de manosa. Otros tres grupos menos nutridos de lectinas abarcan las proteínas similares a jacalina, lectinas de la familia de la amarantina y lectinas del floema de Cucurbitaceae.

Los miembros de cada una de estas familias se caracterizan por la estructura conservada de sus dominios de unión a carbohidratos. Ello no impide que se dé aquí diversidad estructural, lo mismo que en las lectinas animales, dentro de cada familia. Diversidad que resulta de la organización modular terciaria y cuaternaria.

A su vez, las lectinas con un mismo tipo de módulo estructural no comparten necesariamente especificidad de unión a azúcares. Las lectinas que se unen a quitina y las lectinas de monocotiledóneas muestran especificidad exclusiva por N-acetilglucosamina y manosa respectivamente. Las familias RIP y leguminosas, en cambio, presenta mayor variación: en ambos grupos se encuentran proteínas que reconocen N-

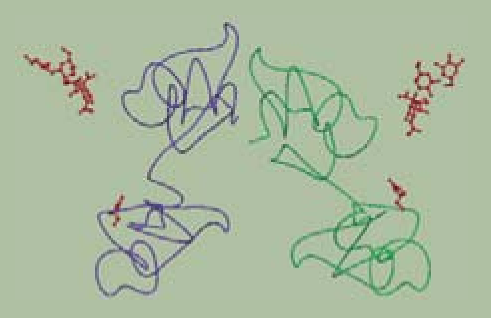


FRANCISCA GALLEGO DEL SOL, CELSO S. NAGANO, BENILDO S. CAVADA, ALEXANDRE H. SAMPAIO, LIBIA SANZ Y JUAN JOSE CALVETE

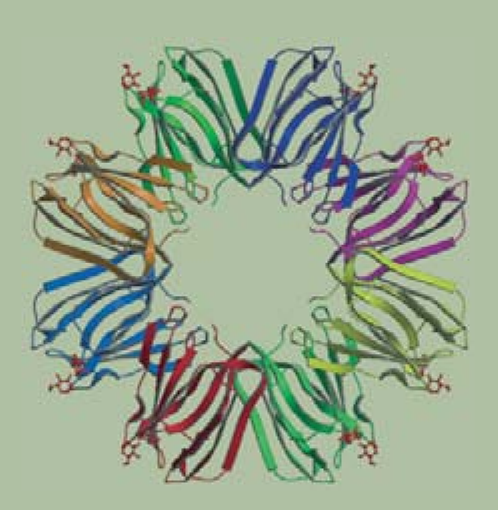
3. LECTINAS DE LEGUMINOSAS. Distintas asociaciones diméricas del dominio de unión a carbohidratos (*a-c*) identificadas en la estructura cristalina de las lectinas PNA de semillas de cacahuete (*Arachis hypogaea*) (*d*), DBL de *Dolichos biflorus* (*e*) y ConA de *Canavalia ensiformis* (*f*). Se muestra la orientación relativa de los cuatro sitios de unión de azúcares lactosa y metil-α1,2-manósido en los tetrámeros de PNA y ConA, respectivamente. La lectina de *Dolichos biflorus* (*e*) contiene dos moléculas de adenina en los sitios de unión a fitohormonas; sus sitios de unión a carbohidratos aparecen marcados con un asterisco.

LECTINAS VEGETALES

La mayoría de las lectinas vegetales conocidas se agrupan en cuatro grandes familias de proteínas, que guardan un parentesco evolutivo: lectinas de leguminosas, lectinas que se unen a quitina, toxinas que inactivan al ribosoma (RIP, de "ribose-inactivating proteins") y lectinas de monocotiledóneas específicas de manosa. Otros tres grupos menores de lectinas abarcan las proteínas similares a jacalina, lectinas de la familia de la amarantina y lectinas del floema de Cucurbitaceae. Aquí se muestra la estructura cristalina de lectinas constituidas por dominios de unión a carbohidratos representativos de algunas de estas familias.



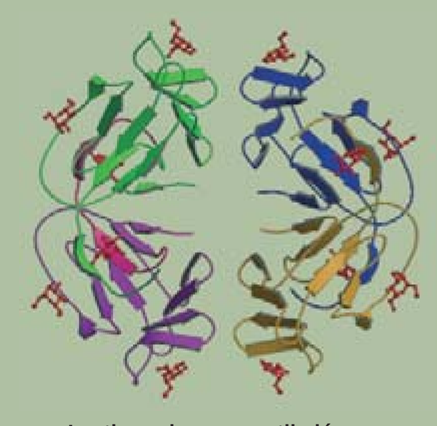
Proteínas que se unen a quitina
Complejo de WGA de la semilla de trigo con NAc5Neu-lactosa



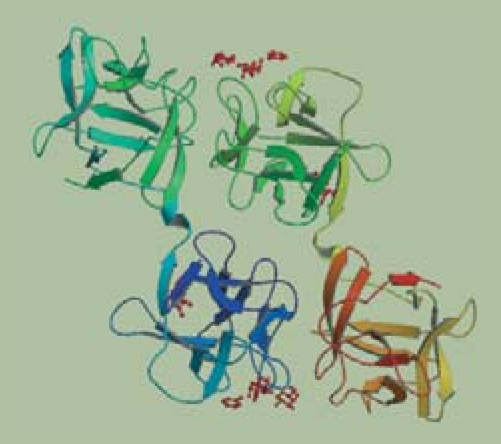
Lectinas similares a jacalina
Heltuba de bulbos de *Helianthus tuberosus* con el disacárido Manα1,3Man unido a cada monómero



RIP
Ricina de semillas de *Ricinus communis* con D-galactosa, D-glucosa y α-D-manosa-NAcGlc unidos



Lectinas de monocotiledóneas específicas de manosa
GNA de bulbos de *Galanthus nivalis*



Lectinas de la familia de la amarantina
Complejo de ACA de semillas de *Amaranthus caudatus* con el antígeno T

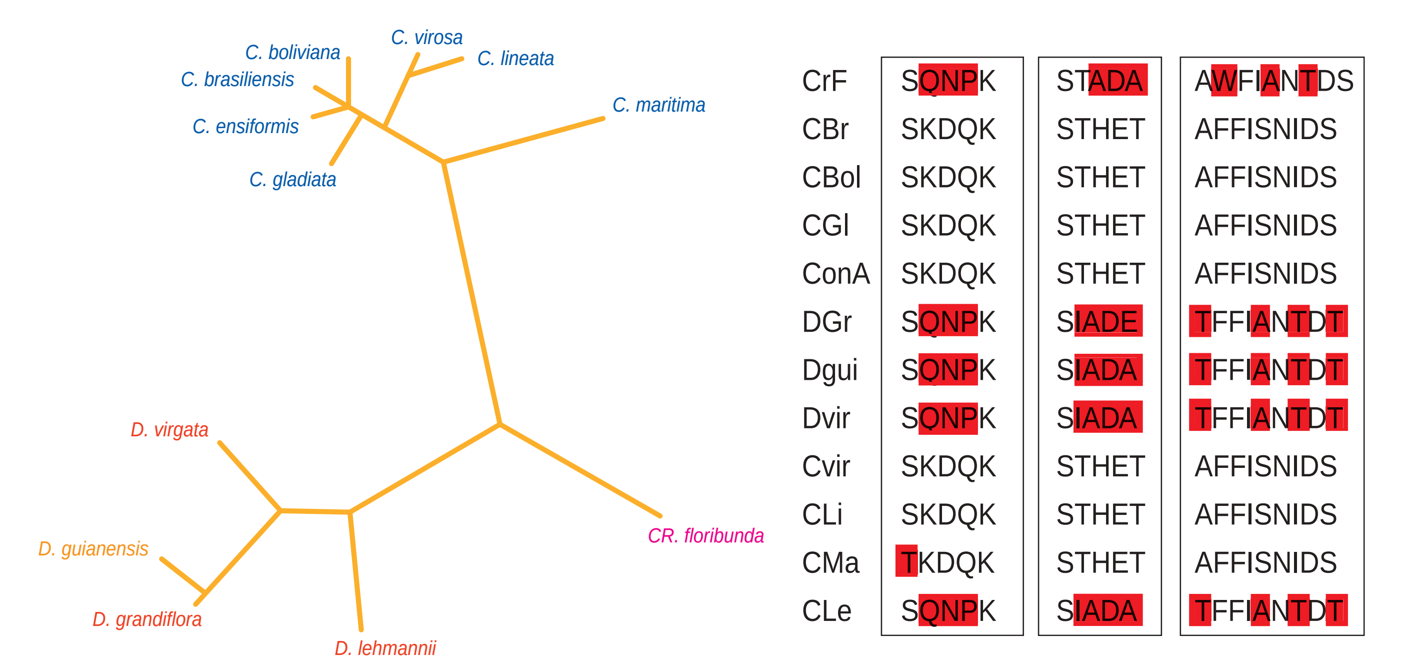
acetilgalactosamina, galactosa, manosa y glucosa, fucosa, ácido siálico y polisacáridos complejos.

Familias de lectinas vegetales

Las lectinas que se unen a quitina constan de uno o más dominios de heveína, un pequeño módulo estructural de unos 43 aminoácidos, tramado por cuatro enlaces disulfuro. Ese módulo se describió en la proteína ácida del látex del árbol productor de caucho *Hevea brasiliensis*. Las lectinas aludidas se hallan representadas en todo el reino vegetal, sobre todo en gramíneas (trigo, cebada y arroz, entre otras) y solanáceas (patata, tomate, etcétera). Abundan las que muestran actividad antimicrobiana; por ello se consideran proteínas de defensa. Algunas causan alergias en humanos.

El análisis filogenético de las lectinas con dominios de tipo heveína nos revela que han seguido dos mecanismos evolutivos. Uno, clásico, se basa en sustituciones, deleciones e inserciones de aminoácidos. El otro implica la inserción del dominio de heveína en genes distintos, dando origen a lectinas compuestas por múltiples dominios de heveína en serie (hololectinas de gramíneas) o a proteínas quiméricas, formadas por un dominio de heveína fusionado a otro u otros dominios estructurales, o dotadas de actividad enzimática.

Las lectinas quiméricas con dominios de heveína se caracterizan por su extensa distribución taxonómica en plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas. Las quitinasas de clase I (proteínas de defensa antifúngica) son ubicuas en plantas superiores; de lo que algunos infieren que la diversificación, a partir de un antepasado común, debió iniciarse en los primeros estadios de la evolución de estos cormófitos.



4. TAXONOMIA MOLECULAR DE LECTINAS DE DIOCLEINAE. Arbol filogenético de las lectinas de especies de los géneros *Canavalia*, *Dioclea* y *Cratylia* de la subtribu Diocleinae de leguminosas (*izquierda*). Se muestran los detalles de un alineamiento múltiple de secuencias (*derecha*); en rojo se destacan aminoácidos específicos de *Cratylia floribunda* y de las lectinas de *Dioclea* que pudieran servir de base para un fenotipado de utilidad taxonómica.

FRANCISCA GALLEGO DEL SOL, CELSO S. NAGANO, BENILDO S. CAVADA, ALEXANDRE H. SAMPAIO, LIBIA SANZ Y JUAN JOSE CALVETE

Ricina, la lectina tóxica de *Ricinus communis* descrita por Stillmark, pertenece al tipo 2 de la familia RIP. Estas proteínas no son exclusivas de euforbiáceas. Las encontramos también en semillas y tejidos vegetativos de leguminosas (*Abrus precatorius*), viscáceas (*Viscum album* y *Phoradendron californicum*), pasifloráceas (*Adenia digitata* y *A. volkensii*), ranunculáceas (*Erantis hyemalis*), lauráceas (*Cinnamonum camphora*), sambucáceas (*Sambucus nigra*), cucurbitáceas (*Momordica charantia*) e iridáceas (*Iris* sp.).

Las lectinas de la familia RIP constan de dos subunidades, A y B. La cadena B posee actividad lectínica: es responsable del anclaje a la superficie celular. Una vez anclada, la lectina penetra en la célula por endocitosis y libera la subunidad A al citoplasma. La subunidad A escinde entonces, por vía enzimática, un residuo específico de adenina de un bucle conservado del ARN ribosómico; ello entraña la inactivación de los ribosomas y la muerte celular. Algunas RIP-2 muestran, *in vitro*, actividad antivírica frente a virus vegetales; ello sugiere una función defensiva contra infecciones víricas. Quizá la lectina penetra en la célula infectada y bloquea la replicación del virus mediante la inactivación de los ribosomas celulares.

A diferencia de las lectinas RIP y las que cuentan con dominios del tipo heveína, de notable ubicuidad, las lectinas específicas de manosa aparecen sólo en un subgrupo de seis familias de monocotiledóneas: aliáceas, amarilidáceas, aráceas, bromeliáceas, liliáceas y orquidáceas. Se han encontrado en la mayoría de los tejidos vegetativos (hojas, flores, bulbos, raíces, tubérculos, flores e incluso néctar); nunca, sin embargo, en semillas, salvo en el caso de *Clivia miniata*. La función fisiológica de estas lectinas, cuya primera representante, la lectina de bulbos de *Galanthus nivalis*, fue descrita en 1987 por Els Van Damme, es todavía objeto de debate. Algunas de ellas abundan en tejidos de reserva (bulbos) y operan como fuente de nitrógeno durante el desarrollo de la planta. Otras, cuya expresión y concentración permanecen constantes durante el crecimiento de la planta (en las hojas, el floema y el néctar), podrían desempeñar una función defensiva contra insectos fitófagos.

En su mayoría, las lectinas de monocotiledóneas específicas de manosa constan de un dominio. Con todo, se sabe de la existencia de lectinas de esta familia formadas por la asociación no covalente de dos o cuatro subunidades, homólogas entre sí en cuanto a la secuencia aminoacídica y a la conformación. Los cerca de 110 aminoácidos que componen la estructura del protómero de estas lectinas crean tres subdominios en hoja de trébol; cada uno expresa un lugar de unión a manosa. La disposición espacial de los lugares de unión a carbohidratos, sobre todo en lectinas oligoméricas, explica la elevada afinidad de éstas por glicanos ricos en manosa. Porque tales glicanos se numeran entre los componentes típicos de glicoproteínas de insectos, se admite que algunas lectinas específicas de manosa cumplen una función defensiva contra insectos chupadores y comedores de hojas.

Pertenecen a la familia de la jacalina (la lectina de semillas de *Artocarpus integrifolia*) las lectinas específicas de N-acetilgalactosamina de semillas de moráceas y las específicas de manosa/maltosa de convolvuláceas, musáceas y asteráceas. La jacalina está formada por la asociación no covalente de cuatro monómeros idénticos, cuya estructura puede definirse como un prisma de 12 hebras beta. Cada protómero posee un lugar de unión a carbohidra-



5. LAS SEMILLAS de *Parkia platycephala*, planta de la familia de las mimosas, contienen lectinas con especificidad por glucosa/manosa.

tos. Lo mismo que las otras familias de lectinas, la de la jacalina presenta diversidad estructural, resultante de la variación en número y disposición espacial de los protómeros constituyentes. La lectina de la alcachofa de Jerusalén (*Helianthus tuberosus*), por ejemplo, consta de 8 monómeros dispuestos en una estructura octaédrica. Aunque se desconoce su función, esta disposición de los lugares de unión a carbohidratos guarda semejanza con la arquitectura molecular de lectinas de defensa animales y vegetales.

Las amarantinas constituyen un pequeño grupo de lectinas poco estudiadas, aisladas de semillas de varias especies de *Amaranthus*. Todas las amarantinas conocidas corresponden a proteínas homodiméricas, aunque cada protómero consta de dos dominios homólogos del tipo hoja de trébol beta. Su especificidad por N-acetilgalactosamina y por la estructura Gal β(1,)GalNAc (antígeno T) sugiere una función defensiva contra frugívoros.

Lectinas de leguminosas

Las lectinas vegetales más numerosas y mejor estudiadas son las de leguminosas. La expresión de las cerca de 100 lectinas conocidas de más de 70 especies se restringe a grupos taxonómicos de leguminosas (fabáceas). En su mayoría, se han aislado de semillas, donde llegan a representar hasta el 10 por ciento del total proteico. Allí podrían cumplir una función de reserva; pero la abundancia relativa de lectinas en otros tejidos vegetativos de leguminosas, muy inferior, sufre variaciones durante el desarrollo de la planta.

Las lectinas de leguminosas constan de dímeros o tetrámeros de un módulo estructural de unos 250 aminoácidos; la estructura terciaria del mismo corresponde a dos hojas beta ligeramente acombadas de siete y seis hebras antiparalelas, dispuestas de manera casi paralela en una estructura compacta. El sitio de unión a carbohidratos consta de aminoácidos de distintos bucles, que ponen en conexión hebras beta de ambas caras del dominio.

En 1972 se dilucidó, mediante cristalografía de rayos X, la estructura tridimensional de una lectina. Se trataba de la concanavalina A, la lectina de semillas de *Canavalia ensiformis*. Tras ella, se determinó la estructura de otras lectinas de semillas de leguminosas (de guisante en 1986, de haba en 1986, de lenteja en 1993, de soja en 1995, de habichuela en 1996, etcétera). La investigación sobre la estructura y la especificidad (cinética y termodinámica) de unión a azúcares ha contribuido a que las lectinas de leguminosas se consideren moléculas paradigmáticas para el estudio de las interacciones proteína-carbohidrato.

Todas las lectinas de leguminosas son diméricas o tetraméricas. Presentan variación en la estructura de los dímeros, así como en el modo en que éstos se asocian entre sí para generar tetrámeros. Lo mismo que en otras lectinas, la actividad biológica de las lectinas de leguminosas viene condicionada por la disposición relativa de los lugares de unión a azúcares en la estructura oligomérica. Además, la asociación de dímeros en tetrámeros crea nuevas superficies moleculares que constituyen lugares potenciales de interacción con ligandos.

Reviste especial interés el lugar de unión a adenina y a ciertas hormonas vegetales (citoquininas) en el tetrámero de las lectina de semillas de *Dolichos biflorus*, *Phaseolus vulgaris* o *Glycine max*, pues se halla entre dímeros dispuestos de forma paralela. La afinidad de estas lectinas por la adenina y las citoquininas es de 2 a 3 órdenes de magnitud mayor que la afinidad típica por monosacáridos. Otro tipo de asociación tetramérica específica que llama la atención es el de algunas lectinas de la tribu Diocleinae (a la que pertenece concanavalina A). Se caracteriza por presentar un equilibrio dímero-tetrámero que depende de la acidez (*p*H) del medio. En los tetrámeros de lectinas de Diocleinae los dímeros están orientados ortogonalmente entre sí. En la lectina de *Dioclea grandiflora* (que no presenta equilibrio dímero-tetrámero) los bucles de los cuatro monómeros que ocupan la cavidad central interactúan estabilizando la estructura tetramérica.

En estudios de difracción de rayos X realizados en colaboración con Antonio Romero, del Centro de Investigaciones Biológicas de Madrid (CSIC), hemos demostrado que en la lectina de *Dioclea guianensis* (cuya estructura tetramérica depende del *p*H) la sustitución de una histidina por una asparagina en la posición 131 impide la formación de la red de interacciones que estabilizan la conformación de los bucles de la cavidad central. El número reducido de contactos entre los dímeros de *Dioclea guianensis* respecto a *Dioclea grandiflora* explica la existencia del equilibrio entre las conformaciones dimérica y tetramérica.

Taxonomía molecular

Resulta atractiva la posibilidad de utilizar lectinas para la taxonomía molecular de especies cuyas características morfológicas no permitan una clasificación inequívoca. El potencial taxonómico de lectinas de especies evolutivamente muy cercanas se refleja, por ejemplo, en la comparación de las secuencias de aminoácidos de lectinas de los géneros *Canavalia*, *Dioclea* y *Cratylia*. El análisis filogenético indica que cada género forma una rama del árbol evolutivo de *Diocleinae*; la comparación de la estructura primaria de estas lectinas muestra la existencia de regiones específicas de cada subtribu. Por consiguiente, podemos recurrir a combinaciones de sondas moleculares, específicas de subtribu, en la taxonomía de las Diocleinae.

Corolario

La información cifrada en el genoma se amplifica con la traducción del código en proteínas. Las modificaciones subsiguientes a ese proceso de traducción pertenecen a un nivel superior de codificación de información biológica.

Las lectinas son las moléculas responsables de descifrar códigos relativos a los glúcidos en organismos de toda la escala evolutiva. Los mecanismos de reconocimiento específico de glicanos han surgido de forma independiente en diversos dominios proteicos. Este ejemplo de evolución convergente pone de relieve la importancia biológica de las lectinas.

Nuestro conocimiento sobre la estructura y la función de las lectinas es todavía limitado, si bien en el curso de los últimos años ha crecido de forma casi exponencial. No creemos estar exagerando al pronosticar que la glicobiología y sus protagonistas, lectinas y polisacáridos, van a desarrollar papeles de suma relevancia en la biología molecular y estructural del siglo XXI.

Los autores

Juan José Calvete, profesor de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, dirige el Laboratorio de Proteinómica Estructural en el Instituto de Biomedicina de Valencia (IBV). **Francisca Gallego del Sol** prepara su tesis doctoral sobre la estructura de nuevas lectinas en el Laboratorio de Proteinómica Estructural en el IBV. **Celso Shiniti Nagano** centra su investigación doctoral en lectinas de algas marinas, en el Laboratorio de Proteinómica Estructural del IBV. **Benildo S. Cavada** es profesor del departamento de bioquímica y biología molecular de la Universidad Federal de Ceará. **Alexandre H. Sampaio** enseña en el departamento de ingeniería de pesca de la Universidad Federal de Ceará. **Libia Sanz** realiza su investigación post-doctoral en el Laboratorio de Proteinómica Estructural del Instituto de Biomedicina de Valencia.

Bibliografía complementaria

GLYCOSCIENCE. STATUS AND PERSPECTIVES. Dirigido por H. J. Gabius y S. Gabius. Chapman & Hall, Weinheim, 1997.

PLANT LECTINS: A COMPOSITE OF SEVERAL DISTINCT FAMILIES OF STRUCTURALLY AND EVOLUTIONARY RELATED PROTEINS WITH DIVERSE BIOLOGICAL ROLES. Els J. M. Van Damme, Willy J. Peumans, Annick Barre y Pierre Rougé en *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 17, págs. 575-692; 1998.

CRYSTAL STRUCTURE OF NATIVE AND CD/CD-SUBSTITUTED *DIOCLEA GUIANENSIS* SEED LECTIN. A NOVEL MANGANESE BINDING SITE AND STRUCTURAL BASIS OF DIMER-TETRAMER ASSOCIATION. David A. Wah, Antonio Romero, Francisca Gallego del Sol, Benildo S. Cavada, Marcio V. Ramos, Thalles B. Grangeiro, Alexandre H. Sampaio, y Juan José Calvete en *Journal of Molecular Biology*, vol. 310, págs. 885-894; 2001.

STRUCTURAL BASIS FOR OLIGOSACCHARIDE-MEDIATED ADHESION OF *PSEUDOMONAS AERUGINOSA* IN THE LUNGS OF CYSTIC FIBROSIS PATIENTS. Edward Mitchell, Corinne Houles, Dvora Sudakevitz, Michaela Wimmerova, Catherine Gautier, Serge Pérez, Albert M. Wu, Nechama Gilboa-Garber, y Anne Imberty en *Nature Structural Biology*, vol. 9, págs. 918-921; 2002.

PRINCIPLES OF STRUCTURES OF ANIMAL AND PLANT LECTINS. Remy Loris en *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 1572, págs. 198-208; 2002.

Hace seis años aprendí del caballo de un campesino una importante lección sobre las montañas y el clima. Por entonces estudiaba la geología del antiguo reino de Mustang, ahora parte de Nepal. Mustang se encuentra en alto, en los límites del altiplano del Tíbet, junto a la cabecera del impresionante río Kali Gandaki. Este, tras esculpir un profundo valle entre los picos de más de 8000 metros del Anapurna I y el Dhaulagiri, desciende hacia el sur, hasta las estribaciones del Himalaya. El campesino me explicó que con ese caballo podría cabalgar cuando quisiera por el altiplano; en cambio, me advirtió, si me adentraba en el valle sólo podría montarlo por la mañana.

No entendí lo que quería decir hasta el mediodía, cuando en una angostura del valle el caballo y yo nos encontramos con vientos de fuerza de temporal sin origen determinado. A medida que los vientos se intensificaban el caballo avanzaba más despacio, hasta que finalmente se paró, negó con la cabeza y dio media vuelta. No había forma de que fuese contra el viento conmigo en sus lomos. Al bajarme y llevarlo por la brida hacia el valle, comprobé que el caballo sabía más del tiempo en el Himalaya que yo.

Casi a diario soplan los vientos del valle de Kali Gandaki, de los más potentes vientos anabáticos del planeta. Alcanzan habitualmente y de forma sostenida los 70 kilómetros por hora. Al alba, el aire del valle se calienta; conforme progresa el día, circula ascendiendo desde el valle. Los predecibles vientos de Kali Gandaki son un ejemplo local de cómo una topografía montañosa puede afectar al clima.

Por otro lado, el clima influye de manera significativa en la conformación de la superficie de la Tierra. El viento, el frío, el calor, la lluvia y el hielo esculpen el relieve. La geología ha estudiado durante mucho tiempo la relación entre el clima y el relieve de la superficie. Sin embargo, nuevas investigaciones apuntan a una relación inesperada y profunda —entiéndase al pie de la letra— entre el clima y la evolución de los sistemas montañosos. En ningún otro lugar se ilustra mejor esta relación que en la estrecha conexión existente entre el monzón indio y la evolución continua del Himalaya.

1. **EL HIMALAYA** al alba.

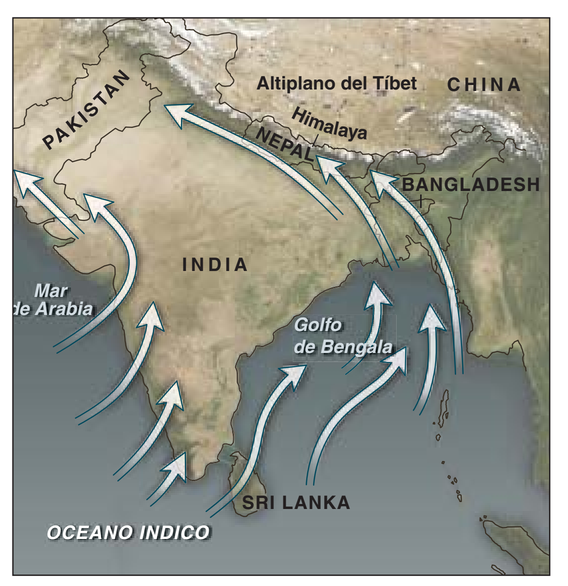


El clima y la evolución de las montañas

Nuevas investigaciones en el Himalaya y el altiplano del Tíbet dan a conocer una estrecha relación entre el clima y la tectónica

Kip Hodges

BETH WALD *Aurora Photos*



2. CORRIENTES DE AIRE HUMEDO (*flechas blancas*) procedentes del océano Indico controlan los monzones que la India experimenta cada verano. Cuando las masas de aire procedentes del oeste afluyen sobre el golfo de Bengala, adquieren más humedad. Se generan así depresiones tropicales. Incapaces de remontar el Himalaya, las tormentas se descargarán en su trayectoria. En algunos lugares las precipitaciones superan las de todo un año en la selva amazónica.

Monzones

Uno de los fenómenos climáticos más espectaculares del planeta, el monzón anual de la India, se produce cuando las temperaturas del aire aumentan en primavera rápidamente sobre el subcontinente indio y más despacio sobre el océano Indico. Resultado de ello, los vientos del sudoeste llevan a tierra un flujo de humedad. Cerca de Sri Lanka, parte del aire cargado de humedad se desplaza hacia el norte a través del sur y el oeste de la India, y parte se dirige hacia el este, hacia el golfo de Bengala (*véase la figura 2*).

La masa de aire que se dirige hacia el este va ganando humedad a su paso por el golfo; se promueve así la formación de una serie de depresiones tropicales sobre la costa nororiental del subcontinente. Estas tormentas —atraídas por las bajas presiones que se producen en el norte de la India, a lo largo de la vertiente meridional de las montañas— avanzan hacia el norte atravesando Bangladesh y la India. Finalmente, chocan con el Himalaya.

Las tormentas se desvían entonces hacia el oeste, donde originan la estación monzónica, que empieza a principios de junio en Bangladesh y el noreste de la India, a mediados en Nepal y a finales en el oeste de la India. Las células convectivas de aire húmedo se reproducen continuamente, como en una olla la sopa más caliente del fondo asciende hirviendo hasta la superficie, en un vano intento de cruzar la muralla del Himalaya. A medida que el aire asciende en estas células, la humedad se condensa y caen lluvias torrenciales.

Las estaciones meteorológicas del Himalaya registran miles de litros de precipitación por metro cuadrado en cada monzón (superan los anuales totales de muchas zonas de la selva amazónica), concentrados en las estribaciones del Himalaya, entre los 1000 y los 3500 metros de altitud. Las precipitaciones en las cimas de la cordillera y en el altiplano del Tíbet son muy pequeñas; por eso, los contrastes climáticos a lo largo del Himalaya resultan extremos. En algunas regiones, el viajero puede atravesar un bosque tropical, recorrer un abrupto territorio alpino y llegar a un desierto de altura, en menos de 200 kilómetros.

El Himalaya, guardián del altiplano del Tíbet, influye en el clima de la región. Pero a su vez el clima influye en lo que ocurra a gran profundidad bajo la superficie. ¿Cómo puede un fenómeno externo ejercer tal efecto en el interior? La respuesta la aportó el conocimiento de las interacciones entre las montañas y el entorno, unido a lo que ya se sabía de la formación de cadenas montañosas. La síntesis se fundamenta en una extensa investigación sobre las diferentes fuerzas geológicas que controlan la creación y continua remodelación de las montañas.

Resumen/El profundo impacto del clima

- Aunque desde hace mucho se conoce la fuerza del clima para modelar el relieve, las nuevas investigaciones nos muestran que el clima puede también influir en la actividad geológica que se produce en las profundidades de la Tierra y desempeñar una importante función en la historia de las deformaciones de los sistemas montañosos.
- Un ejemplo de la relación entre geología y clima se encuentra en el mecanismo de realimentación entre el Himalaya y el monzón anual de la India. Fuertes lluvias erosionan la vertiente meridional del Himalaya. Y esa erosión, según parecen indicar los datos más recientes, causa un lento y suave flujo de material de la corteza desde las profundidades del sur del altiplano del Tíbet hasta el frente de la cordillera, que así se reconstruye y conserva su capacidad de interceptar el monzón.
- El levantamiento rápido y reciente del territorio que recibe las lluvias refuerza la hipótesis de que existe un flujo de material desde la corteza profunda hacia el frente de la cordillera. Entre las pruebas de tal ascenso se cuentan los registros geodésicos, una topografía inusualmente abrupta y los cauces que atraviesan el frente. Las altas tasas de erosión, verificadas mediante estudios termocronológicos, apoyan la hipótesis.

Rudimentos de la formación de montañas

Los geólogos denominan al conjunto formado por el altiplano del Tíbet y la cordillera del Himalaya "sistema orogénico del Himalaya-Tíbet" (de *oros*, en griego "montaña", y de *génico*, "generador"). Esta región posee las cien montañas más altas del planeta. El altiplano, con una superficie parecida a la de la península Ibérica, tiene una elevación media superior a todas las montañas, excepto ocho, de Estados Unidos y Canadá.

La teoría de la tectónica de placas proporciona una explicación parcial de cómo se originaron estos grandes accidentes geográficos. Las mayores montañas del planeta señalan regiones donde secciones de la fraccionada y rígida capa externa

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: KIP HODGES; THE VISIBLE EARTH/NASA (*basado en una imagen de satélite*)

de la Tierra, las placas litosféricas, colisionan unas con otras, o lo han hecho en el pasado. El Himalaya nació cuando la placa india, que se desplazaba hacia el norte desde el supercontinente mesozoico Gondwana, chocó con la placa euroasiática hace unos 45 millones de años. La inercia de la placa india era de tal magnitud, que todavía hoy converge con la placa euroasiática, a una velocidad de cuatro centímetros al año.

El avance de la placa india ha estado desviando sin cesar de su trayectoria una parte de la litosfera euroasiática. Tal y como Paul Tapponnier y Peter Molnar conjeturaron en la década de los setenta, parece haber estado empujando rígidos bloques de litosfera, separados por fallas arqueadas, en dirección este, hacia la parte sudoriental de Asia [*véase* "La colisión entre la India y Eurasia", de P. Molnar y P. Tapponnier; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1977].

Otra de las consecuencias de la colisión de las placas es el acortamiento y engrosamiento de la corteza terrestre (la capa superior de la litosfera). El grosor medio de la corteza continental es de 30 kilómetros. En las cadenas montañosas, sin embargo, puede adquirir una potencia mayor. Y el sistema orogénico del Himalaya-Tíbet es el que sustenta la corteza más gruesa del planeta, con más de 70 kilómetros de espesor en algunos lugares. La correlación entre la potencia de la corteza y la altitud de las montañas manifiesta el principio de Arquímedes: un objeto sumergido en un fluido es empujado hacia arriba por una fuerza equivalente al peso del fluido que desplaza. Del mismo modo que un iceberg grueso flota más alto que un iceberg delgado porque desplaza más agua marina, que tiene una densidad mayor, una región con una corteza excepcionalmente gruesa, como la del sistema orogénico del Himalaya-Tíbet, "flota" a más altura en el manto, más denso, que las regiones circundantes de corteza más delgada.

Flujos de energía y construcción de montañas

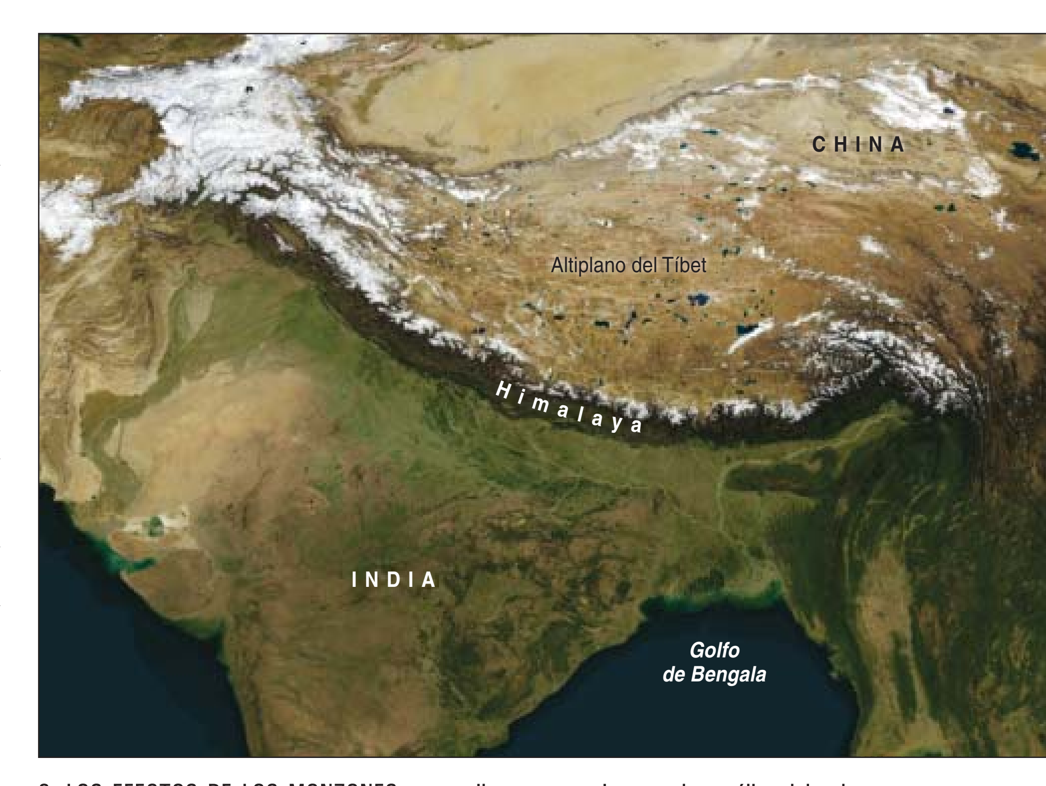
La colisión de las placas ayuda a explicar el origen de las cordilleras. Otros procesos, en los que se transfiere energía, influyen también en la evolución de las montañas. El gran descubrimiento —y sorpresa— de los últimos años ha sido el de la influencia que las lluvias del monzón parecen ejercer en el modo en que se transmite la energía en las profundidades del sistema Himalaya-Tíbet.

Desde la perspectiva de los principios de la física, un sistema orogénico es un reservorio de energía, igual que el embalse de una central hidroeléctrica. Al obstruir la circulación del río, la presa convierte su energía cinética en energía gravitatoria potencial almacenada en el pantano. A causa de la elevación de la superficie del agua del pantano respecto del nivel de la corriente río abajo, la diferencia en la energía potencial de un lado al otro de la presa es muy grande. En cuanto tenga la oportunidad, el reservorio disipará rápidamente su exceso de energía potencial para restablecer el equilibrio con el entorno: romperá la presa. Sólo la resistencia del muro evita la catástrofe.

De forma muy similar, el sistema orogénico del Himalaya-Tíbet posee una tendencia natural a expandirse para disipar el exceso de energía potencial que acumula en virtud de la diferencia entre el grosor de su corteza y el de las tierras más bajas circundantes.

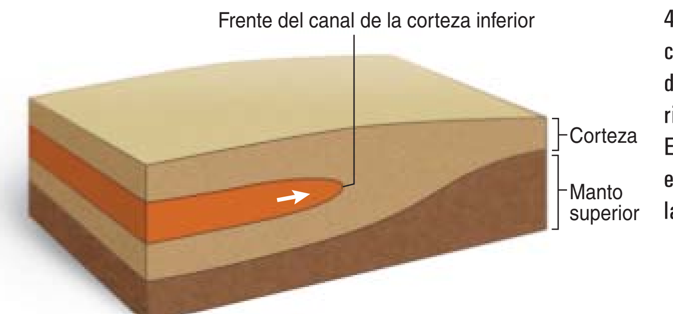
La corteza superior, rígida, fragmentada en bloques por grandes fallas, fluye como la arena. En los niveles más profundos de la corteza, donde las temperaturas y las presiones son mucho mayores, la roca se desplaza como la pasta de dientes cuando se aprieta el tubo. Los modelos teóricos y las observaciones de campo muestran que los canales del fluido de la corteza profunda persisten millones de años. Ante la oportunidad de disipar la energía potencial, se extenderán lentamente. Un reciente estudio elaborado por mis colegas del MIT Marin Clark y Leigh Royden respalda la idea de que el suave y constante descenso de la elevación del altiplano del Tíbet hacia el sureste se debió a un flujo de la corteza profunda del Tíbet hacia el margen oriental del altiplano.

De acuerdo con la investigación reciente, la corteza inferior del Tíbet se desplaza también hacia el sur,



THE VISIBLE EARTH/NASA

3. LOS EFECTOS DE LOS MONZONES se perciben en esta imagen de satélite del subcontinente indio. Al sur del Himalaya, las lluvias torrenciales favorecen el crecimiento de la vegetación, dando a la región su tono verde. Al norte de la muralla de montañas que interceptan el monzón, el altiplano del Tíbet es más seco. Las áreas blancas están cubiertas de nieve.



4. ALGUNOS GEOLOGOS han conjeturado que bajo el Tíbet discurre un flujo lateral de material fluido de la corteza inferior. El flujo disiparía el exceso de energía gravitatoria potencial en la región del altiplano.

Este tipo de sistemas de fallas, los "sistemas de despegue", son comunes allí donde la corteza se extiende y adelgaza. Podemos hallar ejemplos en las dorsales mesooceánicas o en el *Basin and Range* de Norteamérica, las tierras comprendidas entre el altiplano de Colorado y Sierra Nevada. Hasta que se descubrió el sistema del sur del Tíbet, nadie sospechaba la existencia de grandes sistemas de despegue en lugares donde colisionan placas tectónicas.

En nuestro empeño por incorporar el sistema de despegue en la dinámica general del sistema orogénico del Himalaya-Tíbet, planteamos la hipótesis de que el flujo de la dúctil corteza profunda realimentase continuamente el frente de la cordillera del Himalaya: el material entre el sistema cabalgante principal frontal y el sistema de fallas del sur del Tíbet, especialmente las rocas suprayacentes sobre el sistema de cabalgante principal central, se mue-

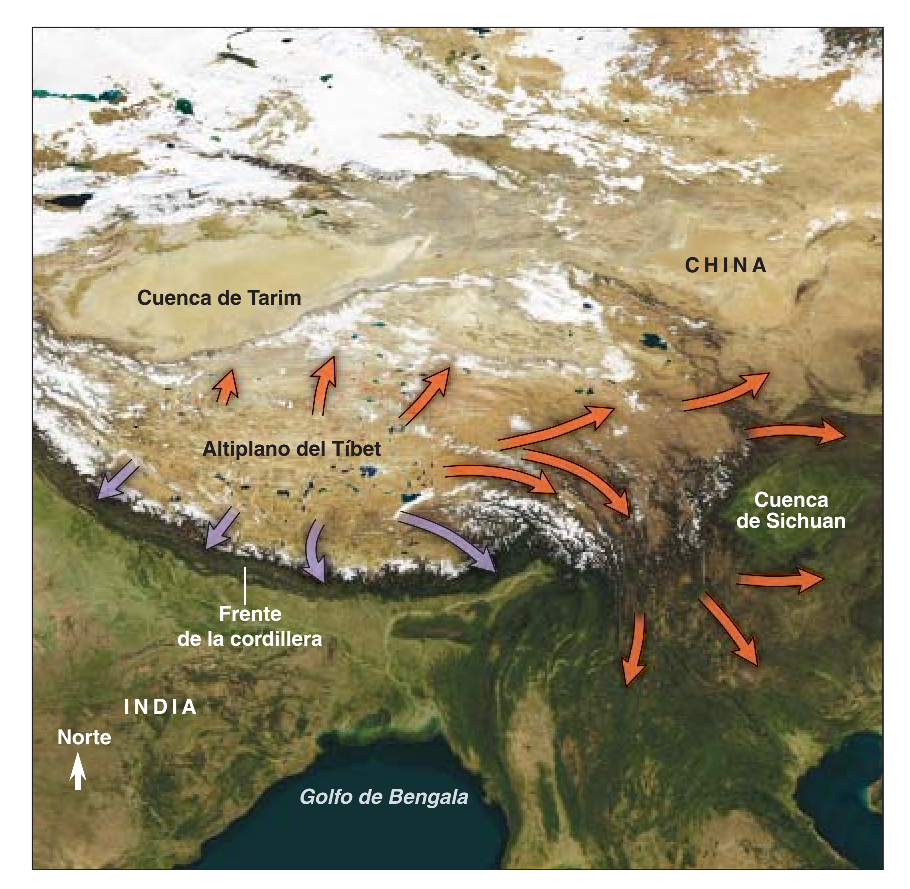
directamente hacia el frente del Himalaya. Para entender por qué, debe recordarse que el agua de un embalse fluirá hacia cualquier fisura que se abre en la presa. A su imagen, cabe esperar que el canal de la corteza profunda se desplace directamente hacia la dirección en la que encuentre menos resistencia, hacia el frente del Himalaya, donde la erosión de la superficie —por las lluvias monzónicas— se muestra más activa.

Este flujo de corteza sirve de punto de apoyo para las nuevas teorías sobre la relación entre el monzón y las montañas. A medida que las lluvias van erosionando el frente del Himalaya, el margen meridional del altiplano del Tíbet debería migrar hacia el norte. En cambio, hay indicios de que el material erosionado es reemplazado por material del canal de la corteza profunda, que avanza hacia el sur y hacia la superficie. Y para cerrar el círculo de la realimentación, la erosión del frente montañoso atrae a ese canal hacia la superficie.

Disección del flujo

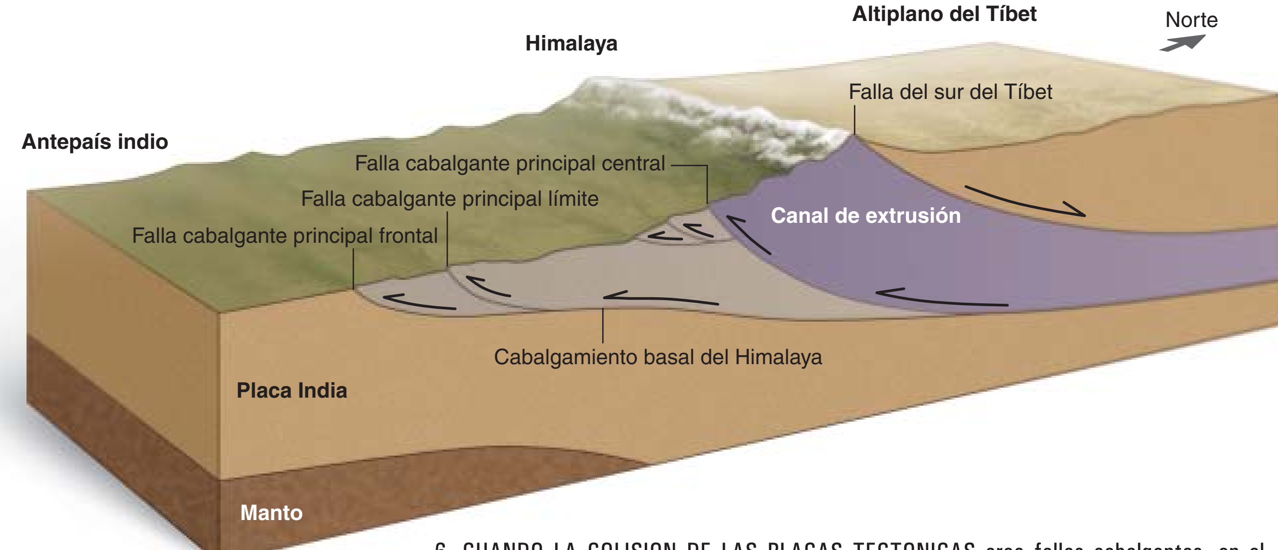
Esta interpretación se cimienta en un estudio sobre las principales fallas del Himalaya. La mayoría de las grandes fallas de las regiones montañosas son de tipo cabalgante, que suele generarse durante las colisiones de las placas. Una sección vertical norte-sur del Himalaya mostraría una arquitectura dominada por los sistemas de fallas cabalgantes principal central, principal límite y principal frontal, que confluyen en profundidad para formar el cabalgamiento basal del Himalaya. El material que se halla sobre estas fallas se mueve hacia el sur (llevado por la cinta transportadora del cabalgamiento) respecto al material subyacente.

Hace unos 20 años un equipo del MIT, junto a investigadores de otras instituciones, identificó un segundo tipo de sistema de fallas en el Himalaya. El hallazgo cambió radicalmente nuestra visión de la formación de montañas por colisión entre continentes. El sistema de fallas del sur del Tíbet, cerca de las crestas del Himalaya, constaba de fallas con una geometría similar a la de las fallas cabalgantes, pero con una cizalladura de sentido contrario: las rocas que en este sistema se hallaban sobre las fallas se habían movido hacia el norte respecto a las rocas que se hallaban debajo.



5. EN MUCHAS REGIONES (*indicadas arriba con flechas naranja en la imagen de satélite*), el canal del flujo no fragmenta la superficie; sólo va levantando la corteza a medida que se aleja del interior de la meseta. Sin embargo, en algunas regiones, donde las intensas lluvias monzónicas provocan una rápida erosión (*indicadas con flechas púrpura*), el canal puede alcanzar la superficie.





6. CUANDO LA COLISION DE LAS PLACAS TECTONICAS crea fallas cabalgantes, en el terreno se producen "imbricaciones". Así ocurrió en el Himalaya cuando chocaron las placas india y euroasiática. Se han encontrado fallas de un segundo tipo cerca de la cresta del Himalaya, descendiendo hacia el norte, bajo el altiplano del Tíbet. Constituyen el sistema de fallas del sur del Tíbet. Guardan similitudes geométricas con las fallas cabalgantes, pero a lo largo de este sistema las rocas se deslizan en sentido contrario. Quizá sean el punto más alto del canal de material fluido de la corteza profunda que se encuentra bajo el Tíbet. Nuevos indicios sugieren que el deslizamiento hacia el norte a lo largo del sistema de fallas del sur del Tíbet y a la vez hacia el sur a lo largo de las fallas meridionales permite la extrusión en sentido sur de este canal, hacia el frente de la cordillera del Himalaya. (Las regiones marrones se mueven hacia el norte. Las violetas y las grises, hacia el sur).

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: "SOUTHWARD EXTRUSION OF TIBETAN CRUST AND ITS EFFECT ON HIMALAYAN TECTONICS", POR K. V. HODGES, J. M. HURTADO Y K. X. WHIPPLE, EN TECTONICS, VOL. 20, N.O 6, PAGS. 799-809; 2001

ve hacia el sur respecto tanto al material que se halla sobre el sistema de fallas del sur del Tíbet como al que se encuentra bajo el cabalgamiento basal del Himalaya. Se cree que esta zona de extrusión orientada al sur representa el dúctil canal de la corteza profunda del Tíbet en su camino hacia la superficie.

Las pruebas indican que el sistema de fallas del Tíbet y el sistema de cabalgamiento principal central estaban activos a principios del Mioceno, hace entre 16 y 22 millones de años. A finales de los ochenta, Clark Burchfiel, Leigh Royden y el autor propusieron un modelo sencillo. En el seno del mismo, un deslizamiento coordinado de esos sistemas de fallas en el Mioceno Inferior desvió hacia el sur el movimiento del canal de rocas entre ambos sistemas. Según nuestro punto de vista, este proceso fue provocado por el diferencial de presión entre el ascendente altiplano del Tíbet y la India.

Desde entonces, varios equipos de investigación han depurado nuestro modelo, llamado de extrusión. Djordje Grujic, por aquel entonces en el Instituto Politécnico Federal de Zúrich, y sus colaboradores demostraron que la existencia de patrones de presión en las rocas, dentro y entre los dos sistemas de fallas, era compatible con la deformación dúctil, similar a la circulación de un fluido por una tubería. La última propuesta, realizada por K. Douglas Nelson, planteaba la hipótesis siguiente: la corteza profunda fluida habría existido bajo el Tíbet desde el Mioceno Inferior; además, la roca que aflora en superficie entre los sistemas principal central y del sur del Tíbet podría constituir el canal de la corteza profunda dúctil, que se habría ido volviendo más rígida a medida que alcanzaba la superficie.

La mayoría de las variantes del modelo de extrusión se han centrado en la evolución del sistema del Himalaya-Tíbet durante el Mioceno, aunque cada vez hay más indicios de que el proceso de extrusión continúa. Algunos grupos de investigación han empleado cronómetros geológicos —basados en la desintegración radiactiva de ciertos elementos presentes en los minerales que cristalizaron durante las deformaciones— para conocer mejor el movimiento de los mayores sistemas de fallas del Himalaya. Los resultados muestran que cerca, o justo al sur, de las líneas de falla de los sistemas principal central y del sur del Tíbet se han producido fallas varias veces a lo largo de los últimos 20 millones de años. La postura de esas deformaciones es muy reciente: las investigaciones de mi grupo indican que las estructuras que habrían podido servir de límites de un canal de extrusión han persistido activas en el Nepal central durante los últimos miles de años. La extrusión podría incluso seguir produciéndose en la actualidad.

Extrusión y evolución del paisaje

Si la extrusión del canal ha desempeñado una importante función en el modelado del Himalaya, deberán quedar señales de un levantamiento, vertiginoso en su rapidez, en las zonas situadas entre las líneas de falla. Las mediciones tomadas en los últimos treinta años con equipamiento topográfico tradicional y por los satélites del Sistema de Posicionamiento Global indican que la zona en cuestión asciende a un ritmo de milímetros al año respecto a la región que se halla al sur de la línea de falla del sistema principal central de fallas cabalgantes.

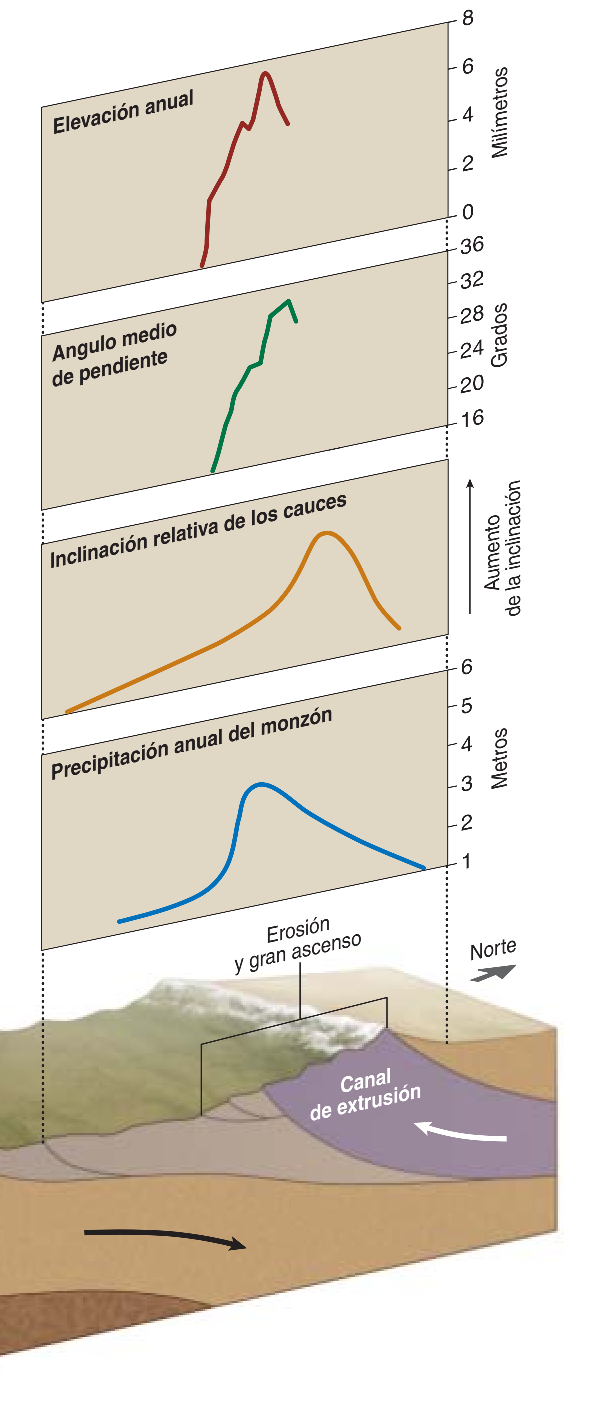
Una prueba adicional de tan célere levantamiento nos lo ofrece el propio

paisaje. En los sistemas montañosos, los ascensos rápidos suelen guardar correlación con relieves abruptos —una gran diferencia en la elevación sobre una corta distancia horizontal— y gradientes fluviales muy pronunciados. En Nepal, en el frente del Himalaya, los perfiles de los ríos exhiben inclinaciones extremas allá donde atraviesan la supuesta zona de extrusión. Además, el análisis de la topografía del frente nos muestra cuán abrupto se presenta el relieve de la zona. Importa averiguar si esta fase de ascenso súbito es sólo un proceso reciente, de las últimas décadas, o si ha persistido a lo largo de tiempos geológicos.

Sabemos que la erosión responde a los monzones actuales. Sin embargo, podemos servirnos de diversas técnicas para calcular la tasa de erosión durante largos períodos. Conociendo la historia de la erosión del frente de la cordillera, podremos obtener una buena aproximación de los pasos seguidos por el ascenso. Uno de los métodos más potentes para estimar tasas de erosión en los sistemas orogénicos se basa en la producción natural de núclidos cosmogénicos (isótopos producidos por rayos cósmicos) en la superficie expuesta de las rocas. La concentración de núclidos cosmogénicos —el berilio 10, el aluminio 26— en las muestras de superficies es proporcional al tiempo transcurrido desde que quedaron expuestas. Cameron Wobus, Kelin Whipple y el autor, con Arjun Heimsath, han aplicado esta técnica en Nepal central. Obtuvimos una tasa de erosión, en la zona de extrusión propuesta, que, a lo largo de milenios, triplica la de la región más meridional.

Se pueden utilizar diferentes métodos para explorar los ritmos de erosión en períodos todavía más largos. Son muy conocidos los "relojes" isotópicos para determinar la edad de materiales geológicos o biológicos (el más famoso, el carbono 14). Pero no todos los cronómetros geológicos miden la edad de cristalización de una muestra de roca. Algunos indican el momento en que la roca, cristalizada a altas temperaturas y a gran profundidad, se enfrió a medida que la erosión permitía su acceso a la superficie terrestre. Gracias al uso de estos termocronómetros para el análisis de las muestras recogidas en el frente del Himalaya, en concreto en el Anapurna, en el Nepal Central, Ann Blythe y mi alumna Kate Huntington han demostrado que la erosión se ha incrementado en la hipotética zona de extrusión por lo menos en los últimos millones de años. En conjunto, los datos aportados por los estudios del paisaje, los núclidos cosmogénicos y la termocronometría apoyan que se ha mantenido un rápido ascenso durante largos períodos de tiempo.

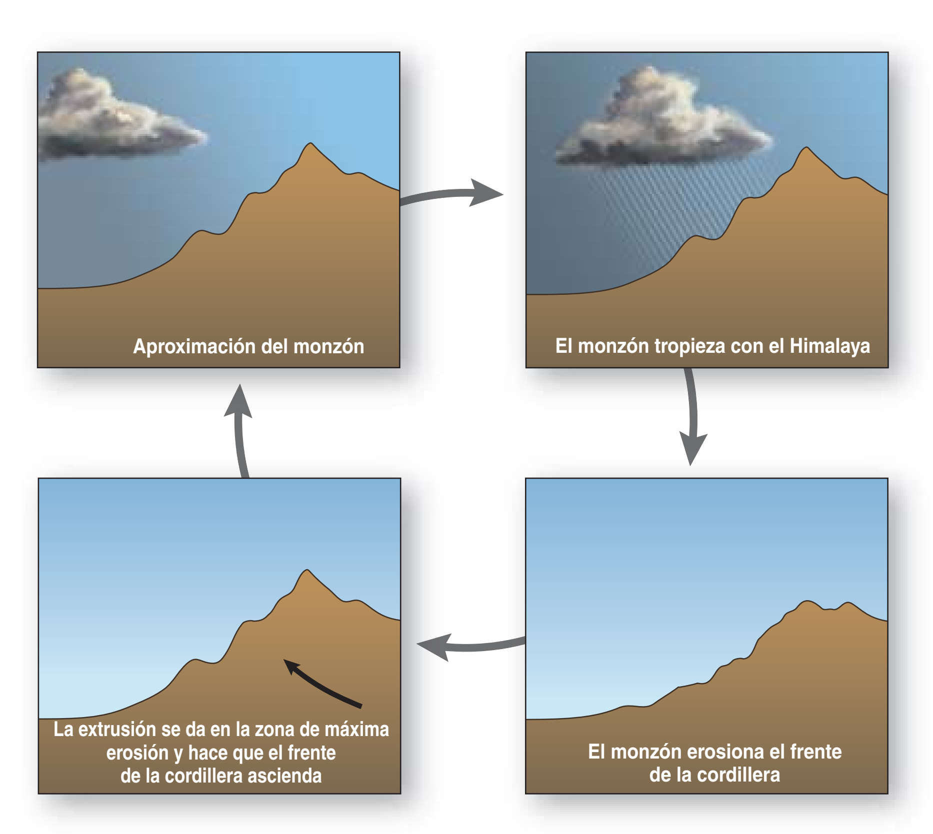
Las masas de agua y el desplazamiento del hielo de los glaciares son los principales agentes de la erosión. Unos índices de precipitación más altos, como los asociados a los monzones, provocarían tasas superiores de erosión en el frente del Himalaya. Si el proceso de realimentación propuesto entre la erosión del frente del Himalaya y la extrusión meridional del canal de la corteza es verosímil, cabría esperar que el patrón de las precipitaciones monzónicas coincidiera con el del ascenso sostenido



7. LA HIPOTESIS DE UN RAPIDO ASCENSO DE LA SUPERFICIE TERRESTRE entre el sistema de fallas cabalgantes principal central y el sistema de fallas del sur del Tíbet se apoya en pruebas de diverso tipo. Se representan en las tres gráficas de arriba. Cada una de ellas, como la cuarta gráfica, muestra la variación norte-sur de la característica que se trate en la zona representada justo debajo. La coincidencia de un incremento sustancial de la precipitación sobre la zona de rápido e inusual ascenso —y la zona entre los sistemas principal central y del sur del Tíbet— hace muy difícil no pensar en una relación fundamental entre el clima local y las deformaciones de la corteza.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: KIP HODGES

8. EL CICLO DE REALIMENTACION entre los monzones y el Himalaya se muestra aquí de manera simplificada. Los monzones de verano viajan hacia el norte, pero bloquean su paso las vertientes del Himalaya; esta obstrucción provoca lluvias enormes. La erosión causada por la lluvia posibilita la extrusión de la fluida corteza profunda del Tíbet hacia el frente de la cordillera. Uno de los efectos de esta extrusión es el ascenso de la superficie, que compensa la rápida erosión que desgasta el frente de la cordillera. El mantenimiento de un frente de cordillera abrupto favorece a su vez el proceso de extrusión durante las lluvias monzónicas. Se perpetúa de este modo un ciclo.



JEN CHRISTIANSEN

de la superficie. Algunos grupos están determinando estos patrones de las precipitaciones basándose en los datos recogidos por satélites y redes de estaciones meteorológicas.

Ana Barros, de la Universidad de Duke, ha dirigido un estudio, en el que han participado diversas instituciones, encaminado a determinar el patrón de las precipitaciones monzónicas en el Anapurna desde 1999. A tenor de sus resultados, las precipitaciones monzónicas son mayores en la zona de erosión y levantamiento rápidos, definida por otras investigaciones. Más importante aún, la coincidencia general entre la región de abundantes lluvias monzónicas y la propuesta zona de extrusión coincide con la hipótesis de que la erosión del frente de la cordillera por el monzón indio crea el canal de extrusión. La extrusión, activada por la rápida erosión, parece construir el muro que intercepta el monzón en su viaje hacia el norte. Las intensas lluvias a lo largo del frente incrementan la erosión que activa la extrusión, completando así el ciclo.

Los modelos teóricos confirman que en los sistemas orogénicos en desarrollo debe esperarse este tipo de relaciones. Chris Beaumont y sus colaboradores, de la Universidad Dalhousie, han aplicado los modelos al análisis del impacto de la erosión en sistemas con canales de corteza profunda mecánicamente débiles. Con un modelo construido para representar la física del sistema del Himalaya-Tíbet en el Mioceno, han mostrado que un canal de corteza profunda débil se propaga ("abre un túnel") lateralmente en regiones con poca erosión superficial y, en cambio, lo hace hacia la superficie en regiones de mayor erosión, como el frente del Himalaya moderno.

La existencia de realimentaciones entre procesos de deformación geológicos y climáticos supone una idea novedosa. Si el clima puede influir en la conformación de las cadenas montañosas, quizá también lo hagan los ecosistemas.

El autor

Kip Hodges investiga la evolución de los sistemas montañosos integrando métodos teóricos y de laboratorio con estudios de campo. Durante 23 años enseñó en el departamento de Ciencias de la Tierra, Ciencias Atmosféricas y Planetarias del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Ahora dirige la nueva Escuela de la Exploración de la Tierra y del Espacio de la Universidad estatal de Arizona.

Bibliografía complementaria

HIMALAYAN TECTONICS EXPLAINED BY EXTRUSION OF A LOW-VISCOSITY CRUSTAL CHANNEL COUPLED TO FOCUSED SURFACE DENUDATION. C. Beaumont et al. en *Nature*, vol. 414, págs. 738-742; 13 de diciembre, 2001.

SOUTHWARD EXTRUSION OF TIBETAN CRUST AND ITS EFFECT ON HIMALAYAN TECTONICS. K. V. Hodges et al. en *Tectonics*, vol. 20, n.º 6, págs. 799-809; 2001.

HAS FOCUSED DENUDATION SUSTAINED ACTIVE THRUSTING AT THE HIMALAYAN TOPOGRAPHIC FRONT? Cameron W. Wobus et al. en *Geology*, vol. 31, n.º 10, páginas 861-864; octubre, 2003.

MONITORING THE MONSOON IN THE HIMALAYAS: OBSERVATIONS IN CENTRAL NEPAL, JUNE 2001. Ana P. Barros y Timothy J. Lang en *Monthly Weather Review*, vol. 131, n.º 7, págs. 1408-1427; 2003.

QUATERNARY DEFORMATION, RIVER STEEPENING, AND HEAVY PRECIPITATION AT THE FRONT OF THE HIGHER HIMALAYAN RANGES. Kip V. Hodges et al. en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 220, págs. 379-389; 2004.

Adiós a las palabras clave

La obsesión imperante por las herramientas de búsqueda de información ha suscitado formas nuevas de utilizar las imágenes para rastrear en la Red

Gary Stix

Puede que una imagen valga más que mil palabras, pero si tecleamos la palabra "rosebud" (pimpollo) en Google Imágenes se obtienen unas 60.000 fotografías. La potencia de una palabra clave se convierte, a la vez, en una ventaja y en un inconveniente: encuentra en la Red una auténtica pila virtual de páginas, pero no distingue entre la flor que se abre y el ceño del legendario cineasta Orson Welles. Lo ideal sería que el usuario de Internet pudiera valerse del aspecto de una rosa para indicarle a un buscador que encontrara otras parecidas.

La idea de utilizar imágenes para buscar imágenes no es nueva. Hace unos diez años aparecieron programas que comparaban una fotografía con otra o tomaban una representación gráfica —por ejemplo, un gran lunar rojo sobre fondo verde— y localizaban, en una base de datos, imágenes de una rosa en un jardín [*véase* "Búsqueda de figuras", por Gary Stix; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1997]. Las búsquedas de este tipo, que dieron en denominarse "técnicas de recuperación de imágenes por contenido", apenas si han progresado más allá de la fase de proyectos de fin de carrera.

Los grandes ingenios de búsqueda no han implantado todavía este mecanismo de recuperación de imágenes en la prospección de sus catálogos de imágenes, que pueden llegar a contener enlaces a miles de millones de fotografías y gráficos. Pero la industria y el mundo académico avanzan en el desarrollo de sistemas que prescinden de las palabras clave y afrontan el análisis del contenido de imágenes en grandes bases de datos.

Imágenes "sabueso"

La proliferación de teléfonos y de agendas electrónicas (o PDA, de "personal digital assistant"), dotados de cámara fotográfica y acceso a Internet, sumada a la dificultad que supone utilizar los dedos para introducir palabras mediante teclados diminutos, abre oportunidades a quienes logren dar con la forma de extraer información de la Red mediante el envío de peticiones en forma de imágenes captadas por la cámara de un teléfono móvil.

Microsoft Research ha identificado una lista de formas de usar la cámara de un teléfono móvil para formular peticiones en la Red. Una persona interesada en una cocina podría fotografiarla en una tienda y, codificada la imagen en forma digital, enviarla a un servidor que devolvería a su teléfono móvil informes publicados en la página de alguna organización de consumidores. Una imagen de la *Mona Lisa* nos llevaría a una página sobre historia del arte. Una instantánea de un edificio singular conduciría a un mapa del lugar donde se encuentra el solicitante. En la opinión de Larry Zitnick, del laboratorio de Microsoft Research en Redmond, este sistema de búsqueda acerca la Red al mundo cotidiano; es como si la Telaraña mirara a lo que uno está mirando. Otro grupo de investigación, del laboratorio de Microsoft en Pekín, se afana en un proyecto similar. En última instancia, los esfuerzos de unos y otros podrían unificarse.

Entre los retos que afrontan estos expertos destaca el desarrollo de algoritmos de búsqueda con potencia para examinar todo el contenido gráfico de la Red. El equipo de Zitnick ha presentado ya un sistema que admite peticiones en forma de imágenes captadas en un teléfono móvil; las envía luego a un servidor, que las compara con imágenes previamente captadas, de "aprendizaje", cada una de las cuales proporciona un enlace al sitio pertinente de la Red. Zitnick se propone confeccionar una base de datos poblada con miles de millones de imágenes captadas por un motor de búsqueda, como el MSN Search. El sistema de Zitnick, que todavía carece de nombre, ejecuta búsquedas entre decenas de miles de imágenes en tiempos de 2 a 4 segundos, un intervalo que deberá reducirse a fracciones de segundo.

Para preparar el sistema, un ordenador analiza fotografías de aprendizaje tomadas de la Red. En cada una busca rasgos o "accidentes" dis-

tintivos: zonas oscuras rodeadas por zonas claras, o viceversa. Algunos de estos rasgos se agrupan de tres en tres, según la distancia que los separa. Cada rasgo representa el punto central de una parcela cuadrada de 10 por 10 píxeles. La agrupación de los tres rasgos recibe el nombre de "terna"; en una imagen de aprendizaje suelen identificarse alrededor de 5000 de ellas. La ubicación de cada terna se almacena (se entra) en una enorme tabla, diseñada para minimizar el esfuerzo computacional que requiere la recuperación de una entrada. La imagen de la petición se descompone también en ternas, que se cotejan con las recogidas en la tabla. Por fin, se envían al teléfono móvil del solicitante páginas de la Red que contienen una imagen concordante. Se optó por utilizar ternas, y no parcelas, como base de comparación porque una terna abarca una superficie mayor de la imagen, lo que debería reducir el riesgo de generar concordancias erróneas entre la petición y las imágenes de adiestramiento.

Igual que en la mayoría de las aplicaciones de reconocimiento de imágenes, las prestaciones de este sistema no son perfectas: la tasa de detección ronda el 80 por ciento. No obstante, la detección de objetos planos cuya superficie tenga mucho detalle —descripción que corresponde a un gran número de objetos de consumo— ofrece resultados mejores. Si se relajan las restricciones de la búsqueda, para maximizar el número de páginas recuperadas, la tasa de detección mejora más todavía. Aunque la búsqueda de una imagen pueda retornar más de una página de la Red, merced a la capacidad para hallar rasgos fotográficos concordantes entre las imágenes solicitadas y las de aprendizaje, el número de imágenes suministradas al usuario será menor y éstas serán más pertinentes que las que proporciona una búsqueda textual ordinaria.

Para ampliar el repertorio de objetos "indagables", Zitnick ambiciona mejorar la capacidad del sistema y hallar superficies reflectantes u objetos con forma tridimensional compleja (una planta, por ejemplo). Con todo, el sistema nunca podrá abarcar la gama completa de objetos detectables visualmente.



AARON GOODMAN

LAS INSTANTANEAS tomadas por un teléfono móvil pueden servir para búsquedas en la Red.

BUSQUEDA POR IMAGENES

En uno de los proyectos de investigación de Microsoft, una fotografía tomada con la cámara de un teléfono móvil se utiliza para buscar en la Red imágenes o información relacionada con la foto.

1 Con la cámara de un teléfono móvil se toma una instantánea (una foto de la *Mona Lisa*, por ejemplo), que se envía por Internet a un servidor de imágenes. El servidor contiene imágenes de aprendizaje, copias de fotografías recogidas por toda la Red, que se han catalogado y guardado para compararse con la foto de la solicitud.



2 Para acelerar la búsqueda de concordancias, el servidor de imágenes busca "rasgos" distintivos: zonas oscuras rodeadas por otras claras o viceversa (*puntos rojos*). Cada rasgo constituye el centro de una parcela cuadrada (a menudo, de 10 por 10 píxeles de lado); algunos se agrupan en conjuntos de tres, donde se encuentran a una distancia especificada unos de otros (*triángulo azul de la derecha*).



Foto solicitada

Búsqueda segura

El reto de escudriñar la inmensa extensión de la Red en busca de imágenes preocupa también a Google. Esta gran central de búsqueda no suelta prenda sobre los detalles de sus planes futuros, pero sus investigadores han empezado a presentar (en los congresos) artículos sobre sus actividades. Para la compañía, la búsqueda de imágenes concordantes o la identificación de objetos individuales como, por ejemplo, una silla, quedan en segundo término frente a la cuestión, mucho más práctica, de cómo proporcionar generalizaciones sencillas acerca del contenido de miles de millones de imágenes. Por ejemplo, ¿corresponde el color sonrosado de una fotografía al de la piel desnuda, o se trata de un edificio pintado de ese mismo tono? Desde los primeros días de la Red, todos los motores de búsqueda de imágenes han sufrido la maldición de que entre los resultados se cuele pornografía indeseada.

Shumeet Baluja, investigador de Google, explica que pretenden identificar las imágenes "no aptas para menores" no sólo mediante el uso de palabras y URL (direcciones de Internet), sino también a partir del análisis de las imágenes. Esta compañía ha desarrollado e implantado un sistema que discrimina con mediana precisión las fotografías pornográficas de las aceptables. El programa, que no recurre a los métodos de reconocimiento de formas (pues consumen desde segundos hasta minutos de procesamiento), detecta la mitad de las fotografías "no aptas" de entre un conjunto de 1500 millones de imágenes en miniatura utilizando 2500 ordenadores durante un intervalo de ocho horas, lo que viene a ser unas 20 imágenes por segundo. Pero el usuario no tendrá que esperar 8 horas: con una herramienta como ésta, quien desee evitar la pornografía se limitaría a indicarle al motor de búsqueda que omitiera los enlaces marcados ya como de contenido objetable.

El sistema opera mediante la combinación de módulos dedicados a la detección de 27 rasgos: color de la piel, píxeles conexos (continuos cromáticos que pudieran representar, por ejemplo, un cuerpo desnudo), textura de la piel y presencia de rostros, entre otros. La piel presenta muchísimos matices; además, son muchos los objetos de la vida diaria cuyo colorido se le asemeja. Uno de los componentes del detector busca un objeto —a menudo un edificio— que suele ofrecer el aspecto de la piel, si bien se distingue por rasgos característicos como bordes largos y rectos. Las fotos que el sistema descubre se marcan y eliminan. Estas imágenes marcadas constituyen uno de los componentes de la búsqueda segura de imágenes de Google ("safe search"), una de las opciones que el usuario puede seleccionar en Google Imágenes y que analiza también contenidos textuales para tomar decisiones sobre lo que podría resultar impropio.

3 Un grupo de tres parcelas (o “terna”) de la fotografía tomada por la cámara (la “petición”) se compara con ternas de imágenes de aprendizaje, en busca de concordancias. De cada petición fotográfica se extraen por término medio unas 5000 ternas, que se comparan con todas las de las imágenes de aprendizaje de la base de datos. La comparación de ternas en lugar de parcelas individuales, como hacen otros métodos de búsqueda, aumenta la probabilidad de hallar concordancias.

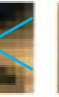
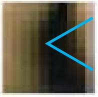
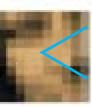




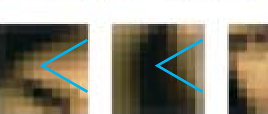


4 Un algoritmo matemático garantiza que todas las parcelas se representen a la misma escala y con la misma orientación. Cuando las comparaciones de ternas detectan una concordancia con una imagen de aprendizaje, se certificará que la concordancia es correcta si hay coincidencia en un conjunto de píxeles de los puntos centrales de la imagen (*cuadrados verdes*).

Terna de la petición

Terna de una imagen de aprendizaje





Fotografía solicitada

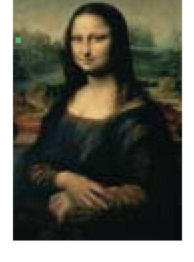
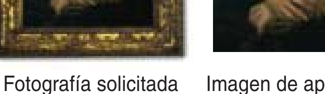


Imagen de aprendizaje



5 Una vez certificada una concordancia, se envía al teléfono móvil del usuario una página web en la que aparece la imagen de aprendizaje.



Para ser de utilidad en la búsqueda de imágenes en la Red, los algoritmos que integran un módulo de búsqueda más amplio deberían ofrecer, sobre todo, eficiencia y prontitud. Baluja y Henry Rowley, investigadores del proyecto de filtrado de imágenes “no aptas para menores”, han logrado reducir de forma notable la cantidad de información necesaria para determinar el sexo del sujeto o la orientación del rostro. La correspondiente aceleración del procesamiento supone un beneficio para los usuarios, pues suelen buscar con mayor frecuencia imágenes de personas que de otro tipo. A Google le gustaría disponer de mejores formas de averiguar si en una fotografía aparece Shakira o Angela Merkel, por ejemplo. Esta compañía cuenta ya con una variedad de filtros para imágenes. Uno de ellos trata de identificar si una persona es hombre o mujer. Otros examinan las ropas de esa persona o indagan su edad.

Los filtros de sexo y de postura facial desarrollados por Baluja y Rowley se han creado a partir de las mediciones de la intensidad (luminosidad u obscuridad) de pares de píxeles dentro de una parcela de 20 por 20, tomada de una imagen que contiene el rostro de un hombre o de una mujer en uno de los casos y distintas posturas faciales en otro. Antes de que el filtro de determinación de la orientación facial ejecute su tarea, un algoritmo formula una conjetura razonable sobre la ubicación del rostro en la imagen. El filtro se ha entrenado de modo que sólo necesite examinar 150 pares de píxeles en una parcela de 20 por 20 píxeles de la zona facial antes de pronosticar, con un 99 por ciento de acierto, si un rostro dado se encuentra en una de cinco posturas (de frente, de semiperfil derecho, etcétera). Aunque se han diseñado para otros usos diversos, los clasificadores de sexo y de postura facial se están incorporando a la opción de búsqueda segura de imágenes de Google.

El equipo de Google propende a infravalorar el virtuosismo técnico por puro virtuosismo. Abordan la investigación desde un ángulo pragmático. Ante un problema, prefieren recurrir a alguna estratagema. No pretenden resolver al cien por ciento la cuestión del reconocimiento de objetos. Dada la densidad de información contenida en cualquier fotografía, la clave del éxito para un buscador de imágenes consiste en hacer que cada píxel cuente.

M. THOMSEN ZEFA/CORBIS (*primer plano de la mujer*)

Bibliografía complementaria

BOOSTING SEX IDENTIFICATION PERFORMANCE. Shumeet Baluja y Henry Rowley. Innovative Applications of Artificial Intelligence, 2005.

LARGE SCALE IMAGE-BASED ADULT-CONTENT FILTERING. Henry A. Rowley, Yushi Jing y Shumeet Baluja. International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 2006.

Los peces y el bosque

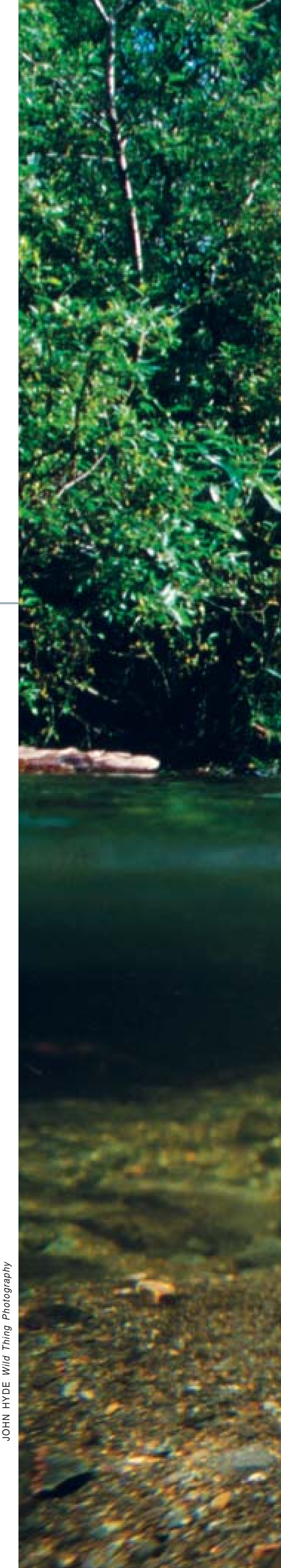
Los osos que pescan salmones fertilizan los bosques con los restos de su alimento preferido

Scott M. Gende y Thomas P. Quinn

Pocos espectáculos de vida salvaje en Norteamérica son comparables con la acumulación de osos a lo largo de ríos y arroyos para capturar salmones en freza, que remontan los cursos de agua en grandes arribazones. Hace tiempo que los osos hambrientos vienen atrayendo la atención; sobre todo del sector pesquero, que a finales de los años cuarenta del siglo pasado propuso su educción a gran escala en Alaska para reducir el "daño económico" que los depredadores podían estar infligiendo a las poblaciones de salmones. No faltaron artículos sensacionalistas que advertían del peligro de una Alaska en "colapso financiero y social" si no se controlaran las poblaciones de osos.

Por fortuna, el sentido común se impuso. La entresaca de osos nunca llegó a realizarse. Y se apagó el interés científico por la interacción entre osos y salmones. Pero en fecha reciente se ha descubierto una nueva faceta de esa relación. El hallazgo ha cambiado de forma radical nuestras ideas sobre los nexos entre salmones, ríos y bosques de ribera. Con las ideas, también los criterios que deberían orientar la gestión de este ecosistema.

Empezamos a investigar en este campo hace más de un decenio. Durante ese tiempo, hemos recorrido centenares de kilómetros de ríos salmoneros, examinado decenas de miles de cadáveres de salmones y nos hemos expuesto en demasiadas ocasiones ante osos excitados. Hemos descubierto un fenómeno sorprendente: los osos fertilizan los bosques mediante el desecho de los cadáveres de salmones parcialmente comidos. Así, estos grandes depredadores aportan valiosos nutrientes procedentes del mar, en forma de tejido de salmón, a los bosques que bordean los ríos, donde los restos de comida proporcionan sustento a numerosos animales y plantas. El flujo de nutrientes desde el océano hacia los ríos y de ahí hacia los bosques sigue una dirección cuesta arriba inesperada —sin precedentes— para el recorrido de



1. UN SALMON ROJO se aleja de un oso pardo que busca comida en un arroyo de Alaska. Cuando se preparan para frezar en el agua dulce, estos peces se tornan de un color rojo vivo con la cabeza verde pálido.

JOHN HYDE *Wild Thing Photography*



los recursos. Mediante una atenta observación del ciclo biológico del depredador y de sus presas preferidas se ha reconstruido este insólito sistema de transferencia.

El expreso de los nutrientes

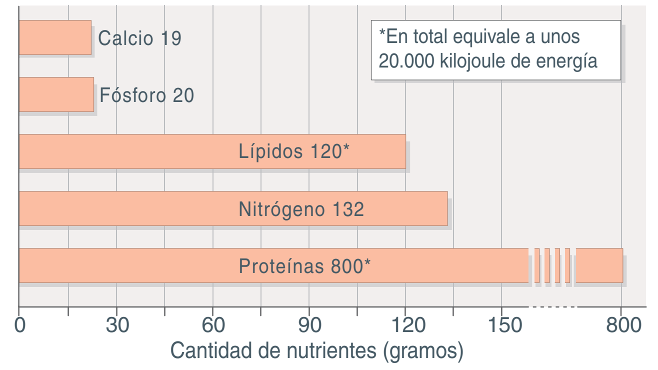
Los salmones del Pacífico (del género *Oncorhynchus*, que incluyen el salmón chinuc, *O. tshawytscha*; el rojo, *O. nerka*; el plateado o coho, *O. kisutch*; el rosado o jorobado, *O. gorbuscha*, y el keta o perro, *O. keta*) varían en abundancia, tamaño y comportamiento, pero comparten el mismo ciclo biológico. Los jóvenes o murgones surgen de las gravas de ríos y lagos en primavera; luego, a lo largo de varios períodos de tiempo, migran hacia el océano. Tras medrar en el mar entre uno y cuatro años, retornan a su río natal para frezar y morir. Cuando abandonan el agua dulce, los salmones jóvenes pesan entre menos de un gramo y 20 gramos; cuando retornan, su peso va desde los dos a los 10 kilogramos o más. Por tanto, aunque la mayoría de los juveniles muere en el mar, la migración de retorno y la muerte de los salmones adultos produce un importante flujo neto de nutrientes y energía desde el océano hacia los ecosistemas fluviales y lacustres.

Esta entrada de energía procedente del océano produce un efecto extraordinario sobre los sistemas de agua dulce, pues los peces constituyen un aporte nutritivo de gran valor y presentan densidades de población elevadas. Por ejemplo, un macho adulto de salmón keta en la zona de desove contiene por término medio 130 gramos de nitrógeno, 20 gramos de fósforo y más de 20.000 kilojoule de energía en forma de proteína y grasa. Si se multiplica la composición nutricional media del salmón por el número total de peces que retornan, encontramos que un tramo de río de 250 metros en el sudeste de Alaska recibió más de 80 kilogramos de nitrógeno y 11 kilogramos de fósforo en forma de tejido de salmón perro en sólo un mes.

Los hábitos alimentarios de los osos que comen salmones (los osos pardos, *Ursus arctos*, también llamados "grizzlies" en localidades del interior, y los osos negros, *U. americanus*) conforman la otra parte de la ecuación. Los salmones constituyen un recurso fundamental para los osos porque la supervivencia y el éxito reproductor de estos mamíferos dependen de la cantidad de grasa que acumulan a finales de verano y en otoño. Una vez entran en sus guaridas a principios de invierno, pasan siete meses sin comer ni beber. Pero al no tratarse de verdaderos hibernantes (su temperatura corporal permanece por encima de la ambiental), los osos deben producir calor corporal para mantener funciones metabólicas a lo largo de los meses fríos. Además, las hembras paren y lactan durante esa época.

Puesto que la supervivencia y el éxito reproductor de los osos guardan una estrecha relación con su condición física en otoño, la selección natural favorece a los individuos que obtienen de los peces la mayor cantidad de alimento. Los osos muestran dos comportamientos en orden a dicho fin. Primero, para evitar la interferencia de otros osos, suelen acarrear la presa a la orilla del arroyo o al bosque de ribera antes de comérsela. Son animales solitarios durante la mayor parte de su vida adulta, si se exceptúan unas semanas de cortejo en primavera y verano. Cuando se agregan en áreas de ribera para alimentarse de salmones, se tornan agresivos. Estas confrontaciones pueden resultar benignas (un oso le quita el salmón a otro) o violentas (las que

NUTRIENTES EN EL SALMON
Basado en machos adultos de salmón keta



DEPREDACION POR LOS OSOS

Arroyo	Número medio de salmones	Número medio de muertos por osos	Porcentaje promedio de muertos
Bear	3907	1183	32
Big Whitefish	786	342	48
Eagle	818	399	53
Fenno	5228	666	12
Hansen	6229	2450	49
Lago Hidden	2010	671	43
Little Whitefish	173	93	58
Pick	5837	1949	35

2. LOS SALMONES CONTIENEN nutrientes tan valiosos (*arriba*) y las densidades de sus poblaciones (*abajo*) son tan elevadas, que los peces ejercen un impacto enorme sobre los ecosistemas de agua dulce. La cantidad total de nitrógeno y fósforo que aportan los restos de los salmones que los osos capturan a lo largo de varios ríos de Alaska iguala o supera las concentraciones recomendadas de fertilizantes naturales para las plantas de los bosques septentrionales.

LUCY READING-IKKANDA

Resumen/Del mar a la ribera

- Para evitar confrontaciones, los osos acostumbran llevar los salmones que capturan a la orilla del arroyo o al interior del bosque.
- Una vez solos y seguros, comen la parte más nutritiva del pez; el resto, de contenido mineral y calórico también valioso, lo desechan.
- Las sobras, ricas en nutrientes, sostienen a toda una jerarquía de animales y plantas.
- La dependencia del ecosistema de los restos de salmones ha atraído la atención de las autoridades pesqueras y forestales, que reconocen ahora la importancia de osos y salmones para el ecosistema.

terminan en lesiones graves o la muerte de un oso o su descendencia). Llevar el cadáver del salmón al bosque, lejos de la vista de los demás osos, es una manera de prevenir la confrontación.

Los osos muestran un segundo comportamiento de sumo interés para el estudio que aquí nos ocupa: suelen comer sólo la parte más nutritiva del salmón. Si la densidad de salmones es elevada, un oso tarda menos de un minuto en pescar una pieza del arroyo; en estas condiciones de abundancia, los osos raramente se comen el pez entero. Un análisis de más de 20.000 cadáveres de salmón reveló que los osos consumían alrededor del 25 por ciento de cada salmón capturado; comían de forma selectiva sólo las partes con mayor contenido graso, como las huevas. Y hasta resulta común que se lleven un salmón a la orilla del arroyo y no coman ni un bocado si descubren que se trata de un macho o de una hembra que ya ha frezado. (Una vez penetran en

ENERGIA PROCEDENTE DEL MAR

Siempre se había considerado que el flujo de nutrientes en los ecosistemas fluviales se desplazaba sólo en un sentido (*flechas naranja*): desde el bosque hacia los arroyos y ríos, y después hacia el mar. Ahora se sabe que en sistemas en los que medran osos y salmones, los nutrientes se desplazan también en el sentido opuesto (*flechas grises*).



ANIMALES que se aprovechan de la carroña de los salmones desechados (*de izquierda a derecha*): águilas calvas, zorros rojos y escarabajos carroñeros.

ILUSTRACION DE LUCY READING-IKKANDA; SUZI ESZTERHAS *Minden Pictures* (*águila*); MATTHIAS BREITER *Minden Pictures* (*zorro*)

el agua dulce, los salmones dejan de ingerir alimento; así, su grasa corporal, que inicialmente es elevada, mengua de forma progresiva —hasta el 90 por ciento o más— conforme migran y frezan.)

Después de consumir los bocados más apreciados, los osos abandonan el cadáver y retornan al río para alancear otro pez. Por tanto, matan muchos más salmones que los que comen. En un arroyo de Alaska sudoriental, por ejemplo, observamos a una hembra de oso pardo de 200 kilogramos capturar más de 40 salmones keta durante varias tandas de alimentación en el transcurso de ocho horas. Extrajo unos 143 kilogramos de salmón (el 70 por ciento de su peso corporal) del arroyo, pero consumió sólo una pequeña fracción del botín.

Entrega especial

¿Por qué revisten importancia para la vitalidad del ecosistema unos hábitos alimentarios insólitos? Después de todo, en ausencia de osos los salmones morirían igualmente tras la freza; sus cadáveres serían aprovechados por aves, peces e insectos de los ríos, descompuestos por microorganismos y transportados al océano. Al matar los salmones más gordos, llevar a los peces cargados de nutrientes al bosque y abandonar los restos del banquete con la mayor parte de la biomasa todavía allí, los osos ponen una notable cantidad de alimento y nutrientes a disposición de las plantas y los animales de las riberas de los ríos, que de otro modo no tendrían acceso a este recurso. Los osos operan como verdaderos ingenieros ecosistémicos: entregan nutrientes derivados del mar al sistema ribereño.

Numerosos animales aprovechan la proteína y la grasa de los peces abandonados. Se produce así una dispersión de nutrientes. Moscas, escarabajos, babosas y otros invertebrados colonizan los cadáveres de forma casi inmediata y ponen allí sus huevos. Gaviotas, cuervos, cornejas, arrendajos, urracas, visones, martas y otras especies de aves y mamíferos acuden prestos a alimentarse de los restos de salmón. (En una ocasión observamos un oso que, tras pescar un salmón, se lo llevó a un prado herboso para comérselo. Cuando otro oso lo distrajo, un visón salió disparado de la hierba alta, agarró parte de la presa y huyó veloz hacia el bosque.) En el estado de Washington, se ha compilado una lista de más de 50 especies de vertebrados terrestres que se nutren de cadáveres de salmón.

La liberalidad del océano no beneficia sólo a los animales que consumen directamente el salmón. Los insectos que colonizan los cadáveres son devorados a su vez por avispas, aves y otros insectívoros, entre ellos pequeños mamíferos como topillos y ratones, que comen no sólo los insectos sino también los restos de los peces. La densidad de aves cantoras insectívoras es mayor a lo largo de los ríos salmoneros que a lo largo de cursos de agua sin salmones en freza. Ese fenómeno nos indica que las comunidades de aves responden a la abundancia de insectos que genera la cosecha de restos de salmón.

Con el tiempo, la acción de todos estos animales, junto con el lavado que efectúa la lluvia y la actividad microbiana, provocan la descomposición de los cadáveres. El nitrógeno, el fósforo y otros nutrientes quedan a disposición de las plantas ribereñas. El crecimiento de las

Por qué algunos osos prefieren bayas

Colgados de una pequeña plataforma de madera a cerca de 30 metros de altura en un árbol de ribera, los autores pasaron más de 1000 horas observando cómo los osos alancean salmones. Descubrieron que entre los osos se forma una estructura social laxa incluso en los arroyos más pequeños. En general, los osos de mayor tamaño ganan en las confrontaciones o son evitados por los osos de menor tamaño, con independencia del sexo de los contrincantes. Los subadultos y las hembras pequeñas, en particular las acompañadas por oseznos, tienden a mostrar mayor subordinación.

Los osos dominantes se alimentan con mayor frecuencia y durante períodos más largos que los demás. Capturan un número mayor de salmones en cada tanda de alimentación; para comer las presas, no se alejan tanto del río. De cada pez capturado, consumen una cantidad menor. Los osos subordinados, en cambio, matan un número inferior de peces por tanda de alimentación, se llevan los cadáveres más lejos del arroyo y comen una porción mayor de cada presa.

El número de osos que se alimentarán en un río pequeño podría hallarse condicionado por un valor límite superior. Conforme los osos se hacen más numerosos y aumentan las interacciones agresivas, los individuos subordinados pueden tener más éxito si comen alimentos de menor valor energético (bayas o hierbas) que salmón. Ello explicaría la presencia de osos en áreas de tierras altas o alpinas, lejos de los ríos salmoneros, incluso en la época de freza del salmón.



LAS CONFRONTACIONES expulsan a los osos subordinados de los arroyos salmoneros; los obligan así a comer a mayor altitud, en prados más tranquilos.

STEVEN KAZLOWSKI *Peter Arnold, Inc.*



3. LOS HELICOPTEROS DISPERSAN CADAVERES DE SALMONES en áreas donde las poblaciones de osos y salmones se han reducido de forma notable o eliminado. En la foto: lanzamiento sobre el río Baker, estado de Washington.

MATT WALLIS *Skagit Valley Herald*

plantas en los bosques septentrionales suele estar limitado por el nitrógeno o por el fósforo. Por consiguiente, los hábitos alimentarios de los osos pueden influir sobre las tasas de crecimiento de diversas especies vegetales de esas zonas.

Según nuestros cálculos, la cantidad total de nitrógeno y fósforo que proporcionan los cadáveres de salmones a lo largo de ciertos ríos y arroyos de Alaska iguala o supera las concentraciones de fertilizante comercial recomendadas para plantas similares de los bosques septentrionales. En algunos casos, hasta el 70 por ciento del nitrógeno en el follaje de matorrales y árboles ribereños tiene su origen en el salmón. No resultó sorprendente, pues, descubrir que el crecimiento de la pícea de Sitka (*Picea sitchensis*), el árbol de ribera dominante en la zona, triplicaba, a la vera de ríos salmoneros, el tamaño alcanzado a lo largo de ríos sin salmones.

Varios estudios demuestran una correlación entre la cantidad de nitrógeno o carbono procedente de los salmones y los desplazamientos de los osos. Correlación que apoya la hipótesis según la cual los hábitos alimentarios de esos mamíferos configuran el mecanismo de transferencia de los nutrientes de los salmones a las plantas de ribera.

Gestión del ecosistema

Estos descubrimientos conllevan la redefinición de la estructura de estos ecosistemas y, por tanto, de los criterios de gestión de los mismos. Tradicionalmente, se pensaba que el flujo de nutrientes en estos sistemas se movía sólo en un sentido, impulsado por la gravedad: los nutrientes, en forma de hojas, invertebrados y otros materiales, caían desde el bosque a los ríos y arroyos, fluían corriente abajo y llegaban al océano. Ahora sabemos que se desplazan también en el sentido opuesto: con los salmones migratorios, los nutrientes viajan desde el océano hasta las aguas continentales y, después, transportados por los osos que se alimentan de ellos, hasta tierra. Cualquier acción que reduzca el número de salmones o de osos repercutirá en el flujo de nutrientes y en los animales que dependen de él.

Las tasas de pesca comercial acostumbran fundarse en el número máximo de salmones que pueden capturarse sin amenazar la viabilidad de la población; en la pesquería se capturan los excedentes. Las autoridades han empezado a reconsiderar dichas tasas para incorporar las necesidades de otras especies del ecosistema. En áreas donde las arribazones de salmones se han reducido, si no desaparecido, agencias estatales transportan ahora cadáveres de salmones a los sistemas ribereños en un esfuerzo de restauración que intenta remedar los procesos naturales hasta que las arribazones de salmones retornen a sus niveles históricos. (Sueltan los cadáveres desde helicópteros o los dispersan desde camiones.)

Los nuevos conocimientos han promovido también la creación de empresas: una compañía de Alaska explota las cualidades de fertilización del nitrógeno y el fósforo derivado de fuentes marinas mediante la exportación de suelo de compost hecho de astillas de madera y restos de salmón.

Hemos recorrido un largo camino, desde los años cuarenta, para desentrañar las ramificaciones ecológicas de los osos pescadores. Sin duda, la investigación seguirá arrojando luz sobre estas cuestiones. Osos y salmones constituyen componentes clave de estos ecosistemas; las poblaciones de ambos se han visto seriamente reducidas o exterminadas en muchas de sus áreas históricas. Queda por ver si el reto mayor reside en comprender el alcance total de esta interacción o en restaurarla allí donde antaño prosperaba.

Los autores

Scott M. Gende es un ecólogo costero del Servicio de Parques Nacionales en Juneau, Alaska. Ha centrado su investigación en los efectos ecológicos de los salmones en ecosistemas acuáticos y terrestres. **Thomas P. Quinn** es profesor en la facultad de ciencias acuáticas y pesqueras de la Universidad de Washington.

Bibliografía complementaria

BALANCING NATURAL AND SEXUAL SELECTION IN SOCKEYE SALMON: INTERACTIONS BETWEEN BODY SIZE, REPRODUCTIVE OPPORTUNITY AND VULNERABILITY TO PREDATION BY BEARS. T. P. Quinn, A. P. Hendry y G. B. Buck en *Evolutionary Ecology Research*, vol. 3, págs. 917-937; 2001.

PACIFIC SALMON IN AQUATIC AND TERRESTRIAL ECOSYSTEMS. S. M. Gende, R. T. Edwards, M. F. Willson y M. S. Wipfli en *BioScience*, vol. 52, n.º 10, págs. 917-928; octubre 2002.

NUTRIENTS IN SALMONID ECOSYSTEMS: SUSTAINING PRODUCTION AND BIODIVERSITY. Dirigido por John G. Stockner. American Fisheries Society, 2003.

MAGNITUDE AND FATE OF SALMON-DERIVED NUTRIENTS AND ENERGY IN A COASTAL STREAM ECOSYSTEM. S. M. Gende, T. P. Quinn, M. F. Willson, R. Heintz y T. M. Scott en *Journal of Freshwater Ecology*, vol. 19, n.º 1, págs. 149-160; marzo 2004.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Haces de ondas y de luz

Múltiples fuentes de ondas electromagnéticas producen juntas un haz cuya energía puede dirigirse a voluntad merced a los fenómenos de interferencia

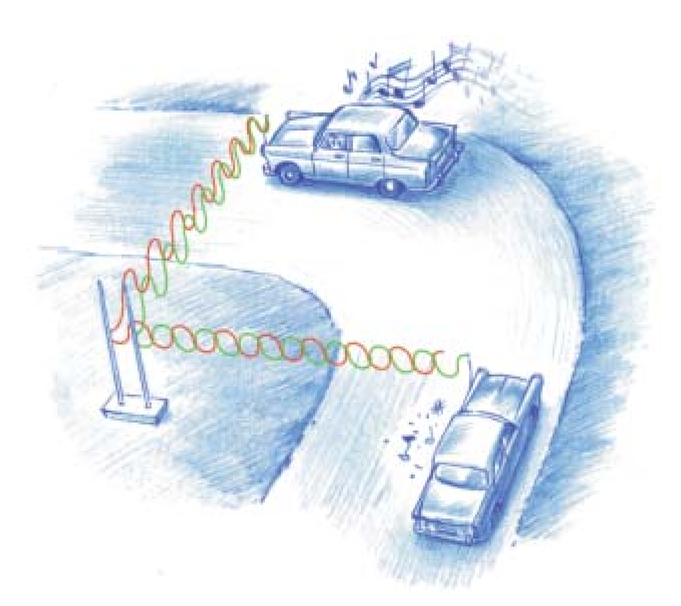
Unos radares de nuevo cuño exploran el cielo sin el menor movimiento. Constan de baterías de antenas; cada uno emite un haz de ondas electromagnéticas cuya orientación se controla mediante la interferencia entre las ondas que emiten las antenas. Limitada hasta hace poco a las radioondas, esta técnica se utiliza ahora para la fabricación de videoproyectores ópticos de calidad.

Y, sin embargo, ¡no giran!

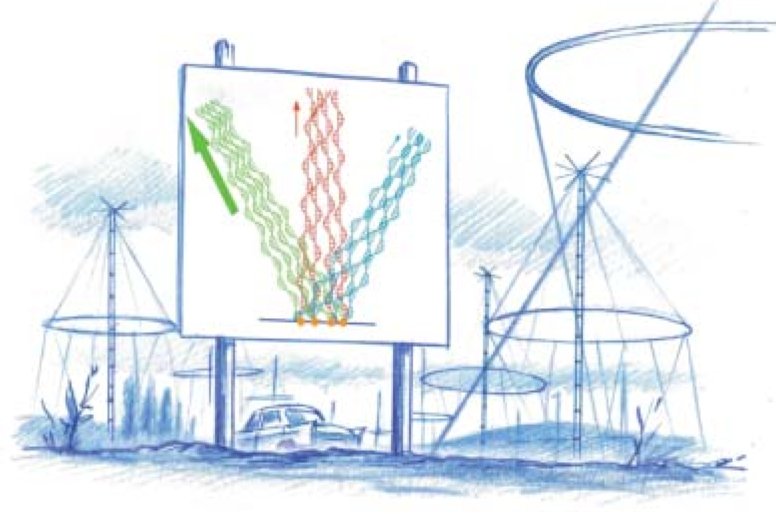
Los radares clásicos localizan los objetos móviles mediante la emisión, en una dirección dada, de un haz de ondas electromagnéticas en el intervalo de las microondas, y la posterior detección del eco de retorno. Las microondas las emite una varilla conductora recorrida por una corriente alterna y situada en el foco de un reflector parabólico, que se encarga de concentrar la radiación de la antena en una sola dirección. El seguimiento de blancos o la exploración del cielo obliga a que el pesado sistema formado por la antena y la parábola gire muy deprisa, lo que entraña problemas mecánicos. Para salvarlos, los ingenieros han desarrollado radares sin partes móviles, que aprovechan las interferencias que se producen entre ondas emitidas por un gran número de antenas.

Para comprender su funcionamiento, consideremos dos antenas que se alcen una junto a otra y que emitan la misma onda electromagnética, es decir, un campo eléctrico y un campo magnético que oscilan sinusoidalmente en el tiempo, a la vez que se propagan. En cada punto del espacio, el campo eléctrico corresponde a la suma de los campos creados por cada emisor. Si nos situamos delante de las antenas, a la misma distancia de cada una, las ondas que recibimos tardan el mismo tiempo en llegarnos: están "en fase", o en sincronía. Sus amplitudes se suman. Se produce una interferencia constructiva: se detecta un campo cuyo valor dobla el del campo de cada antena.

Situémonos ahora en un punto cuyas distancias a las antenas difieran en una semilongitud de onda (la mitad de la distancia que recorre la onda en un período de oscilación). La señal procedente de la antena más lejana nos llega con un retraso de un semiperíodo respecto a la procedente de la antena más próxima; cuando uno de los campos es máximo, el otro es mínimo. Las dos ondas se hallan en oposición de fase. La suma es rigurosamente nula: se produce una interferencia destructiva. Cuando las antenas están separadas una semilongitud de onda, las interferencias destructivas se producen en la línea que une ambas antenas. En semejante configuración, el campo es máximo en la dirección perpendicular al



1. Ondas desfasadas media longitud de onda se interfieren destructivamente (*antes de girar*). Cuando las ondas están en sincronía, la interferencia es constructiva (*después del giro*).

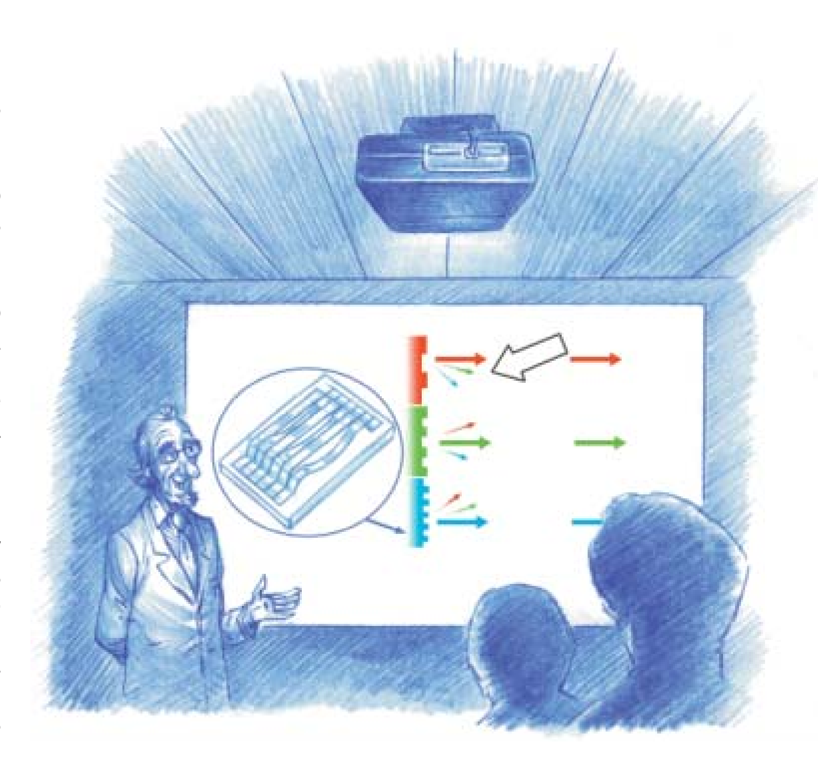


2. Las interferencias de una batería de antenas (*cuatro en el esquema del cartel*) concentran la energía emitida en una dirección privilegiada (*verde*). Gracias a esa propiedad, se construyen radares sin partes móviles.

eje que definen las antenas (la que une los puntos que equidistan de ambas antenas), nulo en la dirección de alineación y de valor intermedio en las direcciones restantes.

Así, la asociación de dos antenas separadas una semilongitud de onda produce un haz más o menos dirigido según el eje mediano (la perpendicular que une los puntos equidistantes). Para dirigir el haz en otra dirección y enfocar un punto, basta con retrasar la emisión del campo de la antena más próxima. Cuando ese retardo equivale al tiempo que tarda el campo emitido por la antena más lejana en cubrir la distancia suplementaria, las dos ondas llegan al punto de forma sincrónica: se produce una interferencia constructiva. La señal recibida es entonces máxima.

Para conseguir un haz más direccional, se asocian en una misma batería un gran número de antenas. El dispositivo más simple consta de antenas alineadas y regularmente espaciadas. Como en el caso de los dos emisores, cuando todas las antenas emiten de forma sincrónica las interferencias son constructivas en la dirección perpendicular a la batería. Cuando nos alejamos de esta dirección, la multiplicidad de los desfases entre las ondas que concurren en un punto hace que las interferencias sean destructivas. La sincronía se da, por tanto, sólo en una posición geométrica precisa. Las ondas emitidas de forma simultánea se interfieren constructivamente sólo en "el eje del haz"; la dirección del haz se modifica a voluntad, operando sobre los desfases entre antenas a través de circuitos de control, las líneas de retardo.



3. En los nuevos videoproyectores, las interferencias direccionales de las señales luminosas reflejadas por un sistema de pequeños espejos producen imágenes de alta calidad y de despliegue rápido.

BRUNO VACARO/*PLS*

También en óptica

Con esa combinación de antenas en batería y líneas de retardo se ha construido, para la navegación aérea, un nuevo tipo de radar carente de partes móviles. Además, el principio puede ampliarse a longitudes de onda hasta ahora inaccesibles a los radares parabólicos. Tal es el caso del *Nostradamus*, construido por la ONERA ("Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales"), que trabaja con una longitud de onda de varias decenas de metros —por tanto, de grandes dimensiones—, para la cual resulta imposible construir un reflector parabólico orientable. *Nostradamus* consta de 288 antenas repartidas sobre los brazos de una estrella de tres puntas. Como las ondas que emite hacia el cielo rebotan en la ionosfera, puede seguir objetos que se muevan más allá de la línea del horizonte: icebergs, buques de alta mar o aviones.

Estos principios se aplican también a la fabricación de videoproyectores que operan mediante el control de haces de luz visible. En este caso se manejan longitudes de onda del orden de fracciones de micra. En lugar de antenas, se utilizan pequeños espejos dispuestos lado con lado e iluminados con una fuente láser.

Dado que los espejos tienen unas dimensiones comparables con las longitudes de onda visibles, difractan la luz reenviándola en todas las direcciones. Iluminemos esa batería de espejos con luz oblicua de modo que la diferencia de las distancias entre el láser y los centros de dos espejos contiguos sea igual a la longitud de onda del láser. Puesto que las ondas que reciben son síncronas, los espejos reemiten en fase: se producen interferencias constructivas en la dirección perpendicular a la batería. Para otra longitud de onda, las ondas ya no están en sincronía; no se emite luz en esa dirección. Mediante la yuxtaposición de tres baterías ajustadas para las longitudes de onda del rojo, el verde y el azul, se consigue un "píxel", que, iluminado con luz oblicua por esos tres colores, reemite cada uno de los tres colores de base hacia un sistema óptico de proyección.

Para conseguir un punto cromático en una pantalla, deben ajustarse además las intensidades roja, verde y azul. Para ello, se dota a cada píxel del equivalente a las líneas de retardo de los radares: sobre cada dos se monta un espejo en una cinta metálica que una tracción adecuada se encarga de hacer retroceder. Cuando esos espejos se desplazan lo suficiente, la luz que reenvían según la perpendicular se propaga una semilongitud de onda más que la de los espejos fijos: entonces, las interferencias en la dirección normal al plano de los espejos son destructivas. Así, mediante la modificación del festoneado de la triple batería de espejos, se controlan las intensidades roja, verde y azul que cada componente reenvía al sistema de proyección. La empresa Sony ha construido un prototipo a partir de una batería lineal de 1080 píxeles; cada uno consta de seis cintas de tres micras de ancho y 100 micras de largo. Esos píxeles forman en conjunto sobre la pantalla una columna vertical, que se desplaza mediante un espejo giratorio para formar una imagen completa. De un contraste y una velocidad jamás logrados antes, este nuevo sistema podría no tardar en equipar nuestras salas de proyección.

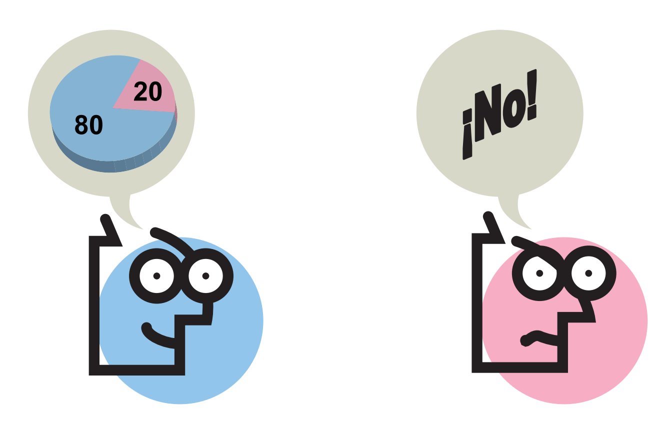
JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M.R. Parrondo

El juego del ultimátum

¿Se puede cuantificar el egoísmo? En 1982, los economistas Güth, Werner, Schmittberger y Schwarze diseñaron un experimento muy sencillo (aunque no barato) que ha posibilitado el estudio cuantitativo de la cooperación y el altruismo en la conducta humana. El experimento se conoce como "juego del ultimátum" y en él participan dos jugadores, aunque cada uno desempeña un papel diferente. Uno se denomina "proponente" y el otro "contestador". El experimentador les ofrece una cantidad de dinero, pongamos 100 euros. El proponente impone el reparto que se le antoje, por ejemplo 80 euros para él y 20 para el otro jugador. Pero es este último, el contestador, quien decide aceptar o rechazar la propuesta de reparto. Si la acepta, cada uno se lleva la cantidad propuesta por el proponente. Pero si el contestador rechaza la oferta... entonces *ambos* se vuelven a casa con las manos vacías.

¿Cuál debería ser la estrategia de cada jugador si ambos actuaran racionalmente y con el único objetivo de maximizar su ganancia? En principio se podría pensar que una propuesta de reparto muy desigual, como la de la figura 1, ofenderá al contestador y será airadamente rechazada. De hecho, así ocurre en los experimentos realizados. Sin embargo, si el contestador tuviera una conducta racional y tratara únicamente de maximizar su ganancia, debería aceptar cualquier oferta, puesto que, rechazándola, estaría perdiendo dinero. A su vez, el proponente, previendo esta conducta racional, debería ofrecer el reparto más desigual posible. Si, por ejemplo, la mínima unidad monetaria de la que dispone para hacer el reparto es un euro, la estrategia racional para el proponente sería la oferta 99/1. El contestador racional, libre de cualquier condicionante emocional, debería contentarse con el euro que se le ofrece, que es en cualquier caso mejor que nada.



1. Un ejemplo de juego del ultimátum en el que el proponente (*izquierda*) ofrece el reparto 80/20 y el contestador (*derecha*) lo rechaza. En este caso, la ganancia de ambos jugadores es nula. El contestador ha sacrificado su ganancia de 20 euros para "castigar" el comportamiento egoísta del proponente.

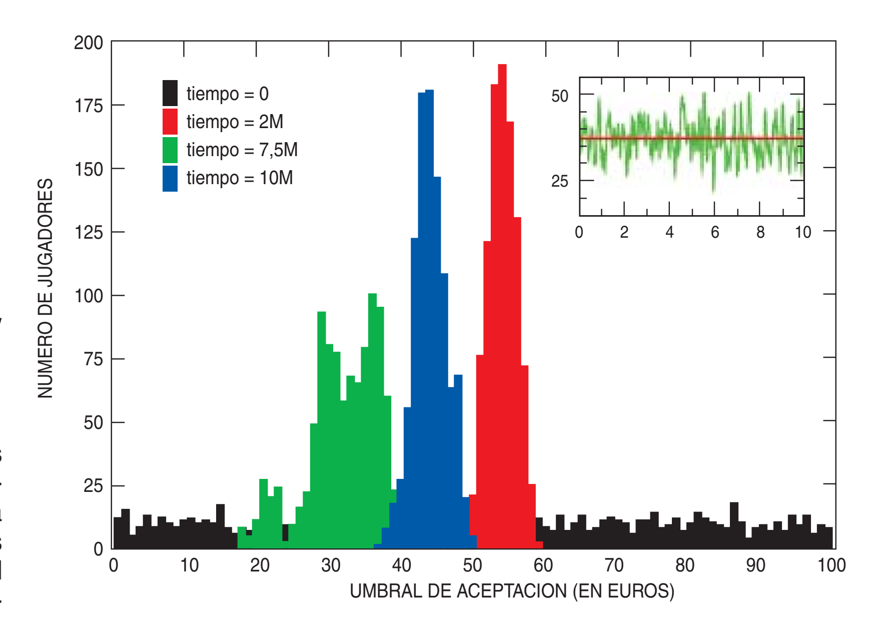
Se puede demostrar que estas estrategias —proponer el reparto más desigual posible en el caso del proponente y aceptar cualquier oferta en el caso del contestador— constituyen lo que en teoría de juegos se llama *equilibrio de Nash*, uno de los conceptos básicos de la teoría de elección racional, sobre la que se basa gran parte de la economía moderna. Cualquier desviación con respecto a esta estrategia racional implica la presencia de algún tipo de componente emocional o de valoración ética.

En los últimos 20 años, se han publicado trabajos experimentales realizados con individuos de países y culturas muy diversas y con dinero real, que a veces alcanza sumas equivalentes al sueldo medio de tres meses. La mayoría de los experimentos se hacen sin que los jugadores se vean las caras o sepan quién es su contrincante y de modo que cada individuo participe una sola vez. Se elimina así la posibilidad de que los jugadores estén influidos por la identidad del oponente o que elaboren algún tipo de estrategia de intercambio. Por supuesto, todos los participantes conocen las reglas del juego y el dinero a repartir.

Los resultados se alejan mucho del comportamiento "racional". Los contestadores no aceptan cualquier cosa: suelen rechazar ofertas muy desiguales. Es decir, son capaces de sacrificar ganancias significativas con tal de castigar a un proponente excesivamente egoísta. Por su parte, el comportamiento típico de los proponentes es ofrecer repartos equitativos, 50/50, o ligeramente favorables. En su variante *juego del dictador*, el contestador es absolutamente pasivo y no tiene opción de rechazar la oferta; éstas se hacen más desiguales, pero sin alejarse mucho de la opción equitativa. Esto indica que la motivación de los proponentes para ofrecer repartos equitativos en el juego del ultimátum es doble: por un lado, un cierto sentido ético o de empatía con su contrincante y, por otro, el temor a que el contestador rechace una oferta no equitativa. Así se confirma en entrevistas realizadas al acabar el juego.

Estos resultados son bastante generales, aunque hay ciertas variaciones culturales. Por ejemplo, los machiguenga del Amazonas peruano suelen ofrecer al contestador cantidades muy bajas, en torno al 26 % del total, y éste suele aceptarlas. Para ellos, el reparto de papeles en el juego es parte del mismo: el contestador no considera una oferta desigual como una muestra de egoísmo por parte del proponente, sino como resultado de su propia mala suerte. Por otro lado, entre los pastores sukuma de Tanzania la media de las ofertas alcanza un 61 % del total a repartir. Brian Paciotti, de la Universidad de California en Davis, ha relacionado este comportamiento generoso con ciertas aptitudes de los sukuma para la

2. Evolución del umbral de aceptación en el modelo de Sánchez y Cuesta para mutaciones rápidas ($s = 1$), inicialmente (*en negro*) y tras 2 (*rojo*), 7,5 (*verde*) y 10 (*azul*) millones de turnos. La simulación se realizó con 1000 participantes que juegan al ultimátum con 100 euros por turno. En el recuadro interior (*en verde*) se puede ver la evolución del umbral medio en función del tiempo (en millones de turnos). [Tomada del *Journal of Theoretical Biology*, vol. 235, 2005.]



organización social. Como en todos los estudios antropológicos, los investigadores tienen que ser muy cuidadosos para no influir inconscientemente sobre los jugadores. Incluso la forma de explicar el juego puede dar lugar a comportamientos distintos entre un experimento y otro. Aun así, el aspecto cuantitativo del juego del ultimátum lo convierte en una herramienta útil para caracterizar la propensión a la cooperación o el sentido de justicia en cada cultura.

Recientemente se ha acuñado el término *neuroeconomía* para referirse a un nuevo campo de investigación que trata de encontrar y estudiar mecanismos de toma de decisiones con componentes no racionales. En la neuroeconomía convergen investigaciones muy variadas: desde los intentos de economistas de incluir motivaciones emocionales en la función de utilidad hasta estudios neurológicos. Por ejemplo, Alan G. Sanfey y sus colaboradores de la Universidad de Princeton han analizado, mediante técnicas de resonancia magnética, qué zonas del cerebro se activan en los participantes en el juego del ultimátum. El resultado fue el esperado: el rechazo viene siempre acompañado de la activación de la ínsula anterior, una zona asociada con distintas emociones negativas, como el asco, mientras que las ofertas muy desiguales activan en el proponente el córtex cingulado anterior, que suele estar relacionado con conflictos cognitivos.

El juego también se ha utilizado recientemente para desentrañar el origen evolutivo de la cooperación. Angel Sánchez y José Cuesta, de la Universidad Carlos III de Madrid, han diseñado un modelo sencillo de evolución de individuos que se enfrentan unos a otros en el juego del ultimátum repartiendo M euros en cada turno. Cada jugador está caracterizado por el capital que ha acumulado X_i y por un umbral u_i entre 0 y M, que es la cantidad mínima que está dispuesto a aceptar. En una primera versión del modelo, cada jugador "supone" que su contrincante piensa como él y, por tanto, le ofrece el reparto: $M - u_i$ (para el proponente), u_i (para el contestador). En cada turno se eligen al azar dos jugadores, i y j, y se les asigna, también al azar, el papel de proponente y contestador. Si, por ejemplo, i resulta ser el proponente y $u_i \geq u_j$, entonces el resultado del juego es:

$$X_i \to X_i + M - u_i$$
$$X_j \to X_j + u_i$$

Por otro lado, si $u_i \leq u_j$, j rechaza la oferta de i y los capitales de los dos jugadores no varían. El modelo incorpora el efecto de la selección natural eliminando, cada cierto número s de turnos, al jugador con menos capital y sustituyéndolo por un "hijo" del jugador con más capital. El umbral de este hijo será similar al de su padre. Más concretamente, si el jugador padre tiene un umbral u_i, el del hijo puede ser u_i, $u_i + 1$ o $u_i - 1$, ocurriendo cada una de estas posibilidades con probabilidad 1/3. Con ello se introducen mutaciones en el sistema, así como la "selección natural" de los jugadores con más éxito.

El resultado de la simulación del modelo con 1000 jugadores y $M = 100$ puede verse en la figura 2, para el caso en el que la selección (reemplazo del peor jugador por un descendiente del mejor jugador) se realiza en cada turno ($s = 1$). Después de un gran número de turnos (suficiente como para que todos jueguen con todos varias veces), los umbrales se agrupan en torno a un cierto valor que cambia con el tiempo, variando entre los 25 y 50 euros. Para mutaciones más lentas, $s = 10.000$, se alcanza una distribución estacionaria muy concentrada en torno a los 47 euros. Es curioso que los resultados de la simulación sean tan cercanos a los reales. Sánchez y Cuesta no pretenden dar una explicación evolutiva del comportamiento humano ante el juego y aún menos una explicación cuantitativa, puesto que el juego del ultimátum es una construcción artificial a la que no hemos estado sometidos los humanos a lo largo de la evolución de nuestra especie (aunque quizá haya situaciones "naturales" formalmente idénticas). Sin embargo, la simulación muestra que la selección natural puede dar lugar a comportamientos cooperativos, sin necesidad de memoria y simplemente a través de la interacción entre parejas de individuos.

Si quieren saber más sobre las matemáticas de la cooperación, pueden consultar el excelente artículo de revisión de Angel Sánchez en el número del pasado mes de junio de *Matematicalia* (www.matematicalia.net), la muy recomendable revista de divulgación de la Real Sociedad Matemática Española.

parr@seneca.fis.ucm.es

Mark Fischetti

GRABACION PERPENDICULAR

En vertical

Desde que IBM introdujo el disco duro hace 50 años, la densidad de almacenamiento de información se ha multiplicado por 65 millones (aumento cuya mayor parte tuvo lugar durante el último decenio). Cada bit de datos de la capa ferromagnética que reviste los diminutos discos de ordenadores, consolas de videojuegos e iPods ha ido disminuyendo de tamaño —ya de sólo 30 nanómetros de ancho— y acercándose a sus vecinos.

Hace años que los diseñadores predicen que la miniaturización llegará a un límite determinado por el efecto superparamagnético: conforme el bit reduce su tamaño, la energía atómica responsable de la orientación magnética que mantiene en su sitio a los átomos del bit (y que define el estado digital de 0 o 1) disminuye tanto, que la energía térmica ambiente la desestabiliza, hasta corromper la información almacenada. Ese día ha llegado. Los grandes fabricantes de unidades de disco están ya despachando productos con una nueva arquitectura.

Este diseño, la grabación perpendicular (o vertical), sustituye a la venerable grabación longitudinal (horizontal). En este caso los bits se magnetizan en dirección perpendicular, y no paralela, al plano del disco; ello permite alojar bits cada vez de menor tamaño y más próximos unos de otros, con lo que la densidad se multiplica por diez. Según los fabricantes, con el nuevo diseño los iPods almacenarían 1500 horas de música en lugar de 150.

Las unidades longitudinales han alcanzado su capacidad máxima: 15,5 gigabits por centímetro cuadrado. Las primeras unidades perpendiculares comercializadas ofrecían 20,1 gigabits por centímetro cuadrado. Mark Kryder, de Seagate en Scotts Valley, advierte que la grabación perpendicular nos dará sólo de 77,5 a 108,5 gigabits por centímetro cuadrado; luego nos encontraremos con el efecto superparamagnético. Las mejoras se traducirán en cuatro o cinco años de nuevos productos.

La próxima etapa, según Kryder, consistirá en la grabación magnética asistida por calor, en la que un láser calentará cada bit a la vez que éste es magnetizado. Se conseguirá así alcanzar los 155 gigabits por centímetro cuadrado.

¿Y luego? Kryder explica que ya están experimentando con dos procedimientos radicalmente distintos: medios modelados y almacenamiento por sonda. Y así hasta el infinito.



1. EN LOS DISCOS DUROS MAGNETICOS la información se graba (se introduce) mientras el cabezal se mueve por encima de los bits alineados en pistas que giran entre 3600 y 15.000 rpm.

2. LOS CABEZALES DE GRABACION LONGITUDINAL escriben la información mediante la magnetización de los granos de cada bit, sea en el mismo sentido de rotación del disco o en sentido contrario. Cada estado estable corresponde a un 0 o a un 1 digital. En los últimos productos de estos modelos, la densidad de los bits se ha aumentado hasta el límite de lo posible.

3. LA GRABACION PERPENDICULAR admite bits de menor tamaño y mayor densidad de empaquetamiento. El cabezal se duplica virtualmente en una capa base magnética; se genera un campo magnético de mayor intensidad que imanta los granos del bit, orientándolos hacia arriba o abajo.

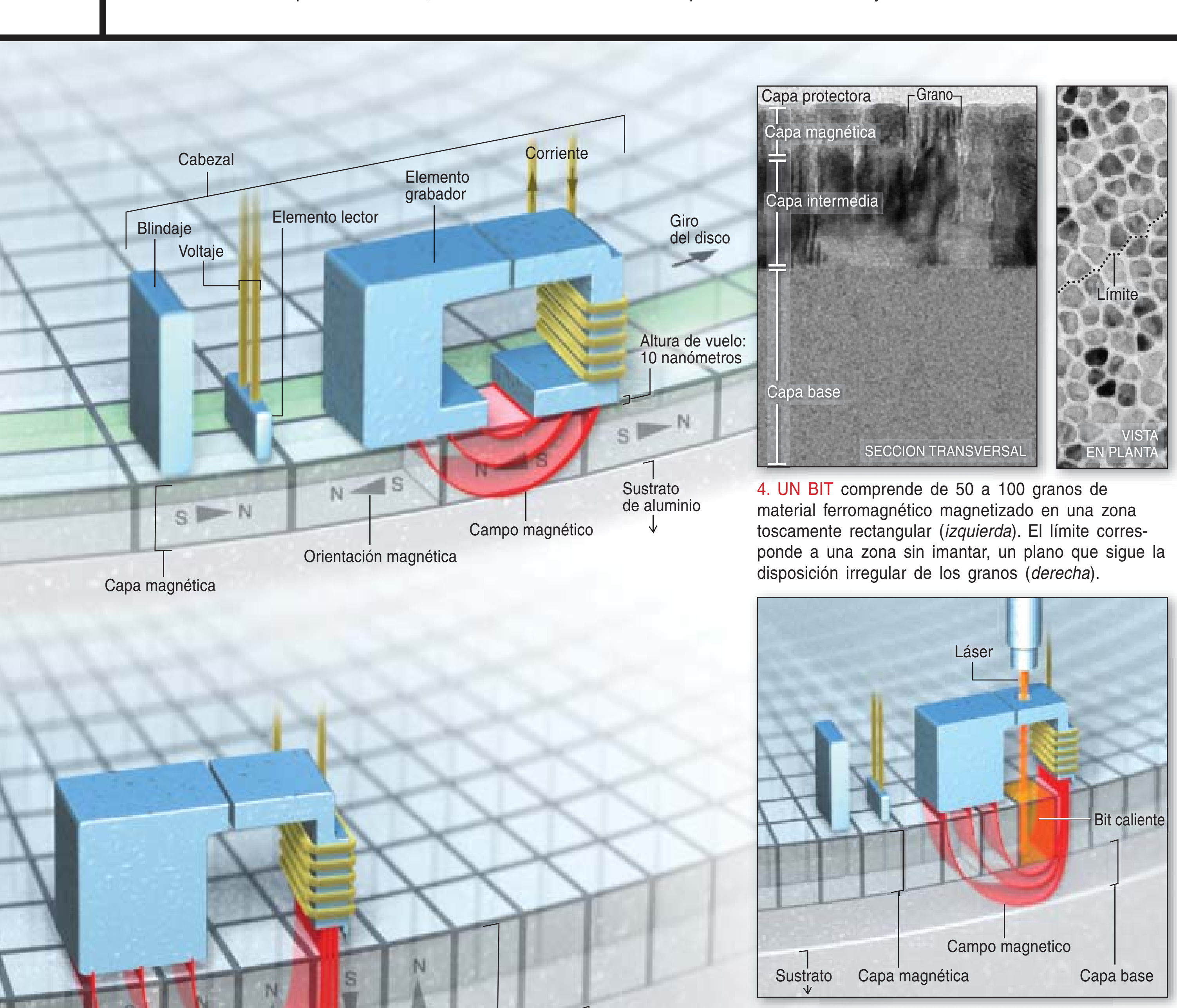
BRYAN CHRISTIE DESIGN; SEAGATE TECHNOLOGY (*micrografías*)

¿SABIA USTED QUE...?

PISTAS MAS PRIETAS: Con pistas más estrechas y menos separadas se consigue una mayor densidad de almacenamiento. En las unidades de disco más vanguardistas se apiñan del orden de 5900 pistas por milímetro, de 110 nanómetros de ancho y separadas entre sí por espacios de 60 nanómetros. El cabezal grabador se ajusta al ancho de la pista, aunque genera pequeños campos magnéticos en los bordes que sobreescriben las pistas contiguas. Para minimizar ese riesgo, los fabricantes hacen uso de cabezales de formas variadas y de blindajes distintos. Esa perturbación resulta más problemática en la grabación perpendicular, pues la capa base común acopla el campo a pistas más alejadas.

MAS PERO MENOS: Dado que las unidades perpendiculares cuentan con una capa base adicional, los costes de fabricación serían mayores que para las unidades longitudinales. Pero, según Mark Kruder, de Seagate, el rendimiento de producción (piezas útiles frente a rechazos) resulta mayor que en las unidades clásicas, lo que compensa el aumento de costes.

DESAFIOS: Las memorias flash de semiconductores (las empleadas en las tarjetas de las cámaras digitales y en las placas de memoria) se están adensando cada vez más. En productos que requieren una capacidad pequeña (como los iPod Nano), la memoria flash compite con los discos duros; resulta algo más cara, pero resiste mejor los choques y las vibraciones. Las unidades magnéticas, sin embargo, cuestan menos por gigaocteto; además, regraban con mayor velocidad y fiabilidad, características cruciales para la mayor parte de las aplicaciones informáticas y de vídeo.



4. UN BIT comprende de 50 a 100 granos de material ferromagnético magnetizado en una zona toscamente rectangular (*izquierda*). El límite corresponde a una zona sin imantar, un plano que sigue la disposición irregular de los granos (*derecha*).

5. LA GRABACION ASISTIDA por calor, en fase experimental, admite bits de menor tamaño. Se fabrican con un material novedoso, más difícil de magnetizar. Cuando el cabezal aplica calor, un láser calienta el bit para rebajar momentáneamente la coercitividad y facilitar así la magnetización.

Historia natural

Origen y evolución

HISTORIA. EMPIRICISM AND ERUDITION IN EARLY MODERN EUROPE. Dirigido por Gianna Pomata y Nancy G. Siraisi. The MIT Press; Cambridge, 2005.

THE SCIENCE OF DESCRIBING. NATURAL HISTORY IN RENAISSANCE EUROPE, por Brian W. Ogilvie. The University of Chicago Press; Chicago, 2006.

LA NATURA E IL CORPO. STUDI IN MEMORIA DI ATTILIO ZANCA. Dirigido por Giuseppe Olmi y Giuseppe Papagno. Leo S. Olschki editore. Florencia, 2006.

VITALIZING NATURE IN THE ENLIGHTENMENT, por Peter Hanns Reill. University of California Press; Berkeley, 2006. HISTORIZITÄT. ERFAHRUNG UND HANDELN-GESCHICHTE UND MEDIZIN. Dirigido por Alfons Labisch y Norbert Paul, con la colaboración de Ulrich Koppitz. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2004.

Asociamos instintivamente la historia a sucesos de la vida civil, las *res gestae* de la *polis*. No siempre fue así. En el alba de la Edad Moderna el género histórico abarcaba por igual la recreación del pasado y el estudio de la naturaleza y de la cultura (*Historia. Empiricism and Erudition in Early Modern Europe*). En un relato que anudaba la pericia observacional con la ilustración filológica, el empirismo con la erudición.

La ciencia renacentista se caracterizó por el desarrollo rápido y exponencial de la *historia naturalis*, aunque sería más correcto hablar de proliferación de historias naturales, con diferentes marchamos. No podemos igualar el modelo aristotélico, sistemático, con el pliniano, enciclopédico y de acarreo. En medicina, las *historiae* u *observationes* clínicas comenzaron a multiplicarse también, lo que no obstó para que, cuando Fabricius de Acquapendente o William Harvey escribieron los resultados de sus investigaciones anatómicas, partieran de la descripción de la estructura (*historia*), antes de indicar la función o "uso" de cada órgano.

Brian W. Ogilvie resume en *Historia* lo que analiza por extenso en *The Science of Describing. Natural History in Renaissance Europe*. Repite el tópico antañón de que la valoración humanista de la experiencia por encima de la teoría resultó decisiva para el desarrollo de la ciencia descriptiva de la naturaleza. Para ello debe minusvalorar la tradición empírica bajomedieval. Cierto es que, con las exploraciones geográficas, aparecieron mundos nuevos con infinitud de formas inéditas y diversas. Ante la imposibilidad de una observación directa, hubo que fiarse de los relatos de viajes. Pero, ¿debían? Para sortear ese escollo, los estudiosos del Renacimiento desarrollaron una técnica que todavía empleamos, las citas. Así se sabía el origen del acierto y del error.

Ogilvie jalona en cuatro etapas o generaciones el camino hacia la autonomía de la historia natural. Comprende la primera de 1490 a 1530. A ella pertenecían humanistas y médicos, cuya preocupación primaria era identificar las plantas medicinales descritas por autores clásicos y depurar los textos transmitidos. En torno a 1500 la historia natural se aprendía en los libros de Aristóteles, Teofrasto y Dioscórides. (Las dudas sobre Plinio habían empezado a menudear.) A modo de complemento, el trabajo de campo permitía identificar las plantas y reconciliar las contradicciones entre los autores.

Progenitor de esta generación fue Niccolò Leoniceno (1428-1524), docente de filosofía y de medicina en la Universidad de Ferrara, donde pugnó por substituir los textos de la medicina árabe. En particular, la botánica médica había quedado corrompida por los árabes y sus seguidores medievales, los "barbari". Pero también reseñaba errores que Plinio el Viejo había introducido a través de su *Naturalis Historia*. Espoleado por ese ataque contra la autoridad de Plinio, el humanista Angelo Poliziano formó frente con Pandolfo Collenuccio en defensa de Plinio.

Tras la publicación de la obra de Ermolao Barbaro *Castigationes plinianae* en 1492, no podía negarse que el texto recibido de Plinio contenía numerosos errores de transcripción. Si Plinio había errado, agregaba Leoniceno, sus errores resultaban peligrosos y sus textos debían excluirse de la docencia a favor de los griegos.

Leoniceno y Collenuccio coincidían en que la forma de averiguar si Plinio tenía razón era apelando a la observación: recoger las plantas descritas y comparar sus descripcio-



Iconografía del sistema vascular, T. L. Berta.

nes con lo percibido. Ese proceso de observación y comparación iba a ser determinante en la historia natural del Renacimiento. Observación y comparación serían proseguidas por los alumnos alemanes de Leoniceno, por ejemplo, Euricius Cordus, cuyo *Botanologicon* (1534) retoma el método de Leoniceno y lo aplica a la flora de los alrededores de Marburgo. Uno de los últimos alumnos de Leoniceno fue Leonhart Fuchs, lumbrera de la generación siguiente.

En su comentario a Dioscórides, Barbaro prosiguió en la labor iniciada con Plinio, aclarando referencias obscuras y corrigiendo errores de bulto. En la traducción de Dioscórides por Marcello Virgilio había también comentarios filológicos. Las versiones latinas, realizadas por Gaza, de las obras de Aristóteles sobre animales y de Teofrasto sobre plantas aportaron la mejor historia natural griega a los contemporáneos que no entendían griego. Otra versión mucho mejor de Dioscórides, la de Jean Ruel, se publicaría en 1516. Pero no se hubiera producido la siguiente generación de naturalistas sin la institucionalización universitaria de la *materia medica*. Los primeros cursos empezaron a darse en la Universidad de Padua en 1533. En Bolonia, Luca Ghini comenzó a enseñar *De simplicibus* en 1534-35. Los cursos solían darse en los jardines botánicos anejos a la Universidad.

El marco epistemológico del científico renacentista se fragua en las facultades de artes, donde se enseña el corpus aristotélico, desde los tratados lógicos hasta los escritos morales y políticos, pasando por los científicos y metafísicos; desde la jerarquización del conocimiento hasta el objeto y contenido de cada disciplina. Merecen especial atención, entre los científicos, los *Problemata* y la *Historia naturae*. Aunque pseudoaristotélicos en su presentación final —38 libros que exponen casi un millar de problemas, acumulados a lo largo de los siglos por la escuela peripatética, en particular, por Alejandro de Afrodisias, Plutarco y Cassio— los *Problemas* de Aristóteles se desarrollaron a partir de un núcleo genuino. Comprendían preguntas y respuestas sobre las causas de los fenómenos naturales, relacionados con la medicina, historia natural y meteorología. Los tradujo al latín Teodoro de Gaza hacia 1473. La *Historia natural* y otros tratados empíricos de Aristóteles son inseparables de la *Historia de las plantas* y demás escritos de su discípulo Teofrasto. La versión de Teodoro de Gaza de la *Historia animalium*, *De partibus animalium* y *De generatione animalium* salió de tiros en 1476. La *Historia plantarum* de Teofrasto, en 1497.



Emblemata D. A. Alciati, Lyon: Guillaume Rouillé, 1550.

La segunda generación transcurrió desde 1530 hasta 1560 e incluía europeos septentrionales que estudiaron en Italia y, a su vuelta, repararon en que las plantas locales divergían de las aprendidas en las descripciones de los autores clásicos. Aunque se trataba de médicos, evidenciaron un interés creciente por el estudio del mundo natural en sí mismo. Su investigación y descripción guardaba una relación muy tenue con el mundo de la medicina. Pertenecían a esta generación los "padres alemanes de la botánica": Otto Brunfels, Hieronymus Bock y Leonhart Fuchs. También, Pietro Andrea Mattioli, quien publicó un comentario a Dioscórides que se convirtió en el herbario estándar de la Italia del siglo XVI; Jean Ruel, autor de una espléndida historia natural en tres libros y de una valiosa traducción de Dioscórides; Valerius Cordus, hijo de Euricius; y Rembert Dodoens. El perfil de los miembros de esta segunda generación puede apreciarse en la vasta correspondencia de Conrad Gessner con media Europa, según se desprende de su *album amicorum* y de su *Historia animalium* (1551-58). Los nuevos herbarios de Brunfels, Bock y Fuchs fueron asumiendo textos antiguos con ilustraciones modernas, tomadas del natural. El herbario más famoso del siglo XVI es el "Manuscrito de Viena" de Fuchs. Consta de tres partes, de 1538, 1624 y 1380 páginas, respectivamente, con un tercio de acuarelas de 315 por 200 milímetros. Fuchs sobrepasa a cuantos le preceden e influye poderosamente en el curso de la medicina y la botánica posteriores. Su obra magna, *De historia stirpium commentarii insignes*, apareció en 1542. La continuación de la *Historia* fue el mencionado *Codex Vindobonensis*.

A esta segunda generación pertenece nuestro Juan Luis Vives, cuya enciclopedia *De tradendis disciplinis* (1531) repasaba todo el saber humano. Vives veía en la historia natural el producto de un conjunto complejo de operaciones cognitivas,



Retrato de Mapondé.

empezando por la “contemplación” de la naturaleza y la comprensión de las categorías metafísicas; cada una de ellas correspondía a una de las “dos principales facultades de la mente”, la percepción (*vis intuendi*) y el juicio. En *De causis corruptarum artium* (1531), reprochaba a los medievales haber adoptado las obras más obscuras de Aristóteles, de los *Físicos* y la *Metafísica* hasta la *Meteorología*, en vez de haber optado por los más provechosos *Historia animalium* y *Problemata*.

La tercera generación se extendió de 1560 a 1590. Aunque se enseñaban los rudimentos de historia natural en las facultades de medicina, los naturalistas se apuntaron al programa descriptivo de sus predecesores con un detalle creciente y estrecharon lazos con herboristas y directores de jardines. Hacia 1560 la historia natural había cristalizado como disciplina. La *peregrinatio academica* permitió anudar lazos de información e intercambio. Representante arquetípico de esta fase fue Carolus Clusius, quien estudió leyes en Wittenberg y medicina en Montpellier, aunque no parece que se graduara ni ejerciera la medicina. Tras su paso por Montpellier volvió a los Países Bajos, donde se relacionó con Dodoens y el boticario de Amberes Pieter Coudenbergh. También entró en contacto con el impresor Christopher Plantin. Y pasó muchos años en casa de Jean de Brancion, dueño de un jardín de aclimatación. Lo que unía a Dodoens, Clusius, Coudenbergh, Plantin y Brancion no era la medicina, sino la posesión de especímenes. Afán coleccionista que encuentra su cumbre en el amplísimo repertorio de *naturalia* y espléndida biblioteca de Rodolfo II en Praga.

En sus *Rariorum aliquot stirpium per Hispanias observatarum*, publicada en 1576, Clusius se refería sólo ocasionalmente a las propiedades medicinales de las plantas, aunque solía resaltar que la planta en cuestión carecía de aplicación medicinal conocida, breves referencias que desaparecieron en 1583, cuando publicó sus *Rariorum aliquot stirpium, per Pannoniam, Austriam, et vicinas quasdam provincias observatarum historia*. Aquí introduce datos sobre el desarrollo y forma de las plantas, su hábitat.

La cuarta generación se desempeñó de 1590 a 1620. Los naturalistas habían descubierto y nombrado tantas especies diferentes, que los principiantes se encontraban abrumados y los propios expertos tenían dificultades en ponerse al día. Intentaron poner orden en semejante barahúnda, empezando por demandar una taxonomía. Característicos de ese tiempo fueron los *florilegia*, que incluían grabados de flores, a menudo procedentes de jardines privados como el *Hortus Eystattensis* (1613) de Basilius Besler, o el *Hortus floridus* (1614) de Crispin van de Passe. Constituían listas de plantas, a veces con breve descripción. Caspar Bauhin epitomiza esa fase. Dedicó más de treinta años de su vida a la preparación de *Pinax theatri botanici* (1623), donde aportaba sinónimos y descripción de cada especie vegetal introducida.

A grandes rasgos la evolución de la zoología se superpone a la del conocimiento y emancipación de la botánica. Con una fase primera de acrisolamiento de los textos clásicos, seguida de otro período de comparación e identificación, con una tercera fase, dominada por la obra zoológica de Gessner, para culminar en la época asociada a los descubrimientos ultramarinos.

De entre todas las novedades, la más importante es la relativa al propio hombre. ¿Ocupa realmente el centro? (*La Natura e il Corpo*). En 1505, época del famoso dibujo de Leonardo da Vinci (*uomo al centro*), Duarte Pacheco Pereira, geógrafo portugués, viaja en una de las primeras naves que bordean Africa. Entre sus anotaciones, la más subversiva, insiere valoraciones sobre los pueblos y observaciones: “Los antiguos nos han mentido. Han dicho que bajo el ecuador no podrían vivir los hombres porque tendrían que hacerlo con la cabeza boca abajo, pero no es verdad”.

Resulta paradigmático lo expuesto por Renato G. Mazzolini a propósito de un caso de albinismo. En la segunda mitad del Quinientos y primera mitad del Seiscientos gozó de amplia difusión la novela *Etiópicas*, escrita por Heliodoro, presumiblemente en el siglo III d.C. Se tradujo al francés (1547), español (1554), alemán (1554), italiano (1556), inglés (1569) y holandés (1634). Sirvió de inspiración para literatos y pintores. Cuenta la historia de Cariclea, hija de Idaspe y Persina, soberanos de los etíopes, que tenían por capital a Meroe. Tras muchos años de esperar un heredero, la reina alumbró a una niña de piel blanca. Persina atribuía el fenómeno extraordinario a que, en el transcurso de la gestación, había pasado largo tiempo mirando un cuadro que representaba a la blanca Andrómeda. Pero, temerosa de que el marido no la creyera, y pudiera considerarla adúltera, entregó su hija en secreto —junto con una telilla donde estaba escrita la historia de la niña— al sacerdote Sisimetre. Trasladándose con la niña a Egipto, el sacerdote etíope la puso en manos de un sacerdote griego, que la adoptó y se la llevó a Delfos. Llegada a la pubertad y enamorada de Teagenes, Cariclea huyó a Egipto. Allí fue hecha prisionera por el ejército etíope y conducida a Meroe, donde fue presentada como víctima sacrificial para celebrar la victoria militar conseguida por los etíopes. Pero reconocida su auténtica personalidad, se salvó.

La historia reúne varios datos de interés. En primer lugar, ilustra la antigua teoría según la cual la imaginación materna puede imprimir algunas características físicas al *nasciturus*. En segundo lugar, también en la antigüedad algunos autores sabían que una piel blanca podía ser engendrada por una pareja de negros. “En

España los llamamos albinos", escribe en 1609 Bartolomé Leonardo de Argensola (1562-1634) refiriéndose a ciertos habitantes de las islas Molucas que tenían la piel blanca como los alemanes y eran ciegos al sol. En la misma denominación abunda el jesuita Juan Eusebio Nieremberg. Los numerosísimos testimonios recopilados en el curso del Quinientos, del Seiscientos y de los primeros decenios del Setecientos parecen converger en algunos puntos, que podemos resumir. Entre las poblaciones negras del Africa subsahariana, de América central y de Asia sudoriental se encuentran individuos de piel blanquísima, con graves problemas de visibilidad diurna y notable acuidad visual en las noches claras de luna. Aunque la piel sea blanca, poseen rasgos de fisonomía y estructura corporal que no son europeos, sino que presentan una extraordinaria similitud con los negros, razón por la cual parece posible que sean hijos de padres negros y hermanos de consanguíneos negros.

Las academias científicas comenzaron también a ocuparse de los albinos. En 1734 fue presentada ante la Academia Real de Ciencias de París una relación de un médico que ejercía en Surinam sobre el parto de una esclava negra de un niño blanco, aunque con todas las características de los niños negros. Al médico le parecía tonto el niño. Y se hacía eco de una leyenda conocida entonces: la existencia de pueblos blancos en el corazón de Africa. Diez años después de ese relato de Treytorens, en 1744, un niño albino fue exhibido en los salones de París y en la Academia de Ciencias. Voltaire y Maupertuis se ocuparon del caso; aquél en un principio dejó entrever que lo consideraba fruto de un adulterio, para éste los padres eran negros. Todavía en su décima edición del *Systema naturae* (1758-59), Linneo clasificó a los albinos como una raza distinta entre los trogloditas, u hombres nocturnos habitantes de las cavernas. En 1775 Blumenbach rechaza la clasificación linneana y consideraba enteramente humanos a los albinos, si bien atribuia el fenómeno a una enfermedad.

A mediados del siglo XVIII se operó un cambio drástico en la forma de abordar la naturaleza (*Vitalizing Nature in the Enlightenment*). Frente al mecanicismo dominante desde cien años antes, se contrapuso un modelo vitalista de la historia natural, de las ciencias de la vida y de la química. Volvieron a primer plano las preguntas perennes sobre qué sea la vida, la muerte, la materia y la mente.

En la Ilustración, además, la naturaleza se convirtió en el nexo unificador de la descripción e historia del hombre, la sociedad, la tierra y el cosmos. A lo largo de su primera mitad, vale decir desde los *Principia* de Newton hasta mediado el siglo XVIII, la filosofía natural se apoyó en métodos matemáticos para explicar los fenómenos. La materia, esquematizada en su esencia, se reconocía homogénea, extensa, dura, impenetrable, móvil e inerte.

Hasta que empezaron a oírse las primeras críticas escépticas, que ponderaban lo contingente sobre lo coherente, lo provisional y limitado del conocimiento humano sobre el absolutismo de la deducción matemática. En la segunda mitad del siglo XVIII se cuestionaba que las operaciones de la naturaleza pudieran ahormarse bajo el yugo de unas leyes simples y generales. La diversidad y la semejanza sustituyeron a la uniformidad e identidad. Más aún: la naturaleza no sólo era compleja, sino que, también, se mostraba en un movimiento incesante de reemplazamiento de viejas formas de existencia por otras nuevas. En breve, la naturaleza tenía historia.

Aunque los neomecanicistas D'Alembert, Condorcet, Lagrange y Laplace seguían proponiendo el concepto de materia inerte, limitaban ahora el papel de la matemática en la descripción de la naturaleza; dejaron de considerarla modelo de realidad y reservaron su función a la de instrumento de descubrimiento. Pero los vitalistas iban más lejos. Se aprestaron a reformular las nociones fundamentales de materia, fuerza y energía. Incapaces los mecanicistas de dar cuenta de la existencia de la materia viva, una vez establecida la separación radical entre mente y materia, tenían que apelar, para su justificación a la intervención de un Ser trascendente como causa ocasional o como Creador de una armonía preestablecida.

En cambio, continuaban los vitalistas, la nueva concepción de la materia disolvía la distinción estricta entre observador y observado, categorías que ahora quedaban subsumidas en el concepto superior de materia viva. Frente a las relaciones de causa y efecto, declaran el imperio de la cooperación en interacción entre fuerzas. Los componentes de la materia viva formaban una "sinergia", en la que cada parte agregada recibía la



Detalle del dibujo de Martagon, por Conrad Gessner.

Planetología

MERCURY, THE IRON PLANET, por Robert G. Strom y Ann L. Sprague. Springer, Praxis Publishing; Chichester, 2003.

Mercurio es el planeta más difícil de observar. Copérnico se quejaba en su lecho de muerte de no haberlo visto nunca. El Telescopio Espacial no se ha atrevido a apuntar hacia él. Sólo el *Mariner 10* pudo acercarse, en 1974-1975, y nos proporcionó imágenes y análisis, pero, por razón de tan temprana fecha, hoy insatisfactorios. Los autores de este libro, profesores de planetología de la Universidad de Arizona, nos cuentan todo lo que puede saberse, hasta que en 2011 llegue a Mercurio el *Messenger*.

El subtítulo hace mención a un hecho anómalo: su abundancia en hierro, que llega a un 70 por 100 del total. De ahí que su densidad sea del orden de 5,4. Sólo la Tierra le supera (5,5). Pero Strom y Sprague recurren al concepto de "densidad comprimida" (consecuencia de la autogravitación); hallan que la densidad de un cuerpo tan poco voluminoso como Mercurio resulta absolutamente inexplicable. Cabe la posibilidad de que un fortísimo viento solar haya volatilizado la mayor parte de los elementos ligeros en Mercurio; aun así, parece que habrá que recurrir a nuevas hipótesis que expliquen tal vez la composición por segmentos de la nebulosa primitiva. La monstruosa abundancia de hierro infiere la existencia de un fuerte campo magnético, nada esperable en un cuerpo que sólo experimenta una rotación completa en 58,6 días. Cierto que se trata de un magnetismo remanente, que sugiere una rotación más rápida hace miles de millones de años.

También es inexplicable la ausencia de basalto en superficie (sin anortositas y piroxeno), cuando existen pruebas de vulcanismo, provocado sin duda por los fuertes impactos exteriores. En Mercurio hay una proporción de cráteres de impacto mayor que en ningún otro cuerpo del sistema solar, e impactos muy fuertes, consecuencia de su rápida velocidad de traslación; no existen, sin embargo, fondos de cráteres oscuros como en la Luna, ni tampoco "mares", sino altiplanicies intercráteres, fruto de una tectónica difícil de explicar. De esta tectónica derivan las largas escarpas, de tampoco fácil explicación, y las profundas fallas.

La depresión más impresionante de Mercurio es la *Fossa Caloris*, fruto de un inmenso impacto. De 1300 km de diámetro, no tiene parangón en todo el sistema planetario. Como quiera que esta enorme depresión se encuentra en el ecuador y allí el mediodía coincide con el perihelio, la temperatura puede alcanzar los 600 ºC. En plena noche baja a los –170º. Semejante diferencia de temperaturas solamente se registra en Mercurio.

Igualmente extraña es la existencia de una tenue atmósfera, en la que encontramos iones de hidrógeno y helio, trazas de sodio, potasio y calcio (posiblemente azufre y oxígeno), que se creen procedentes de la acción del viento solar. La presión no pasa de 10^{-12} bares, pero esa atmósfera existe.

El libro consiste en una colección de incógnitas, presentadas con excelente criterio científico. Las ilustraciones dejan mucho que desear, pues proceden del *Mariner* (1974); pero no hay otras. Se añade un utilísimo índice de toda la nomenclatura mercuriana, glosario de términos, tablas de datos orbitales y físicos, y una excelente bibliografía. —JOSÉ LUIS COMELLAS

influencia de las demás y del medio en el que existía. La noción de finalidad se convierte en causa eficiente del desarrollo. El análisis analógico sustituye al análisis matemático. Mediante la comparación se cartografían semejanzas y diferencias.

Figura determinante del vitalismo de la Ilustración en la historia natural es Buffon, quien, en su calidad de intendente del Jardin du Roi de París, imprimió su sello a la disciplina y conformó el nuevo lenguaje a través de su *Histoire naturelle, générale et particulière*. Se propuso disolver o al menos modular el dualismo cartesiano. Criticó la erudición inútil de Aldrovandi, para subrayar que cumplía a la filosofía natural describir hechos reales y no basarse, a diferencia de la matemática, en supuestos formales.

Buffon reintrodujo la relación entre formas externas y funciones internas. Empleó la fuerza de la gravedad como analogía de las fuerzas internas: una propiedad básica de la materia, una fuerza penetrante que opera internamente. La observación directa e informada, prosigue, nos revela una materia organizada, conjunta y animada. La vida, lejos de constituir un principio metafísico, según entendían cartesianos y leibnizianos, emergía a modo de propiedad física de la materia.

Un cuerpo organizado no era un mero agregado de partículas simples e idénticas. Antes bien, tenía por componentes elementales "moléculas orgánicas", una suerte de arqueo reminiscente de la química de Van Helmont. Incapaz de explicar su naturaleza, Buffon se limita a declarar que se trata de una suerte de prototipo de cuerpos orgánicos más complejos. Otro atributo básico de la materia orgánica era su capacidad de reproducción; cada especie, del pólipo al olmo, tenía la facultad de reproducirse. Por fin, la materia orgánica se hallaba animada por fuerzas activas que operaban más allá de la superficie que confinaba la materia.

De la organización se vale Georges para incorporar *pleno iure* la paleontología en la historia natural (*Historizität. Erfahrung und Handeln-Geschichte und Medizin*). Malabarista con los principios de la anatomía comparada, reconstruye organismos desaparecidos a partir de restos fragmentarios y recupera para la ciencia un sinfín de mamíferos y reptiles; recuérdese su comparación entre los cráneos del elefante africano, el elefante asiático y el mamut de Siberia, que le permitió identificar tres especies distintas. En el *Discours sur les révolutions de la surface du globe*, publicado en su origen como *Discours préliminaire aux Recherches sur les ossemens fossiles* en 1812, expuso sus principios anatómicos de reconstrucción de fósiles, así como su teoría de las revoluciones del globo.

El principio de correlación de los órganos establecía que todo ser organizado forma un conjunto, un sistema único y cerrado, cuyas partes guardan mutua correspondencia y concurren en una misma acción. Ninguna de esas partes puede cambiar sin que cambien también las otras; en consecuencia, cada una de ellas, tomada por separado, indica y da todas las demás. Para Cuvier, cada organismo es un individuo, cuyas características propias se definen en un nexo evidente con su mundo interno y con el entorno exterior, conexiones que definen sus condiciones de existencia. En coherencia con su investigación anatómica, Cuvier pensaba que las especies eran fijas, en discrepancia con la tesis de Lamarck.

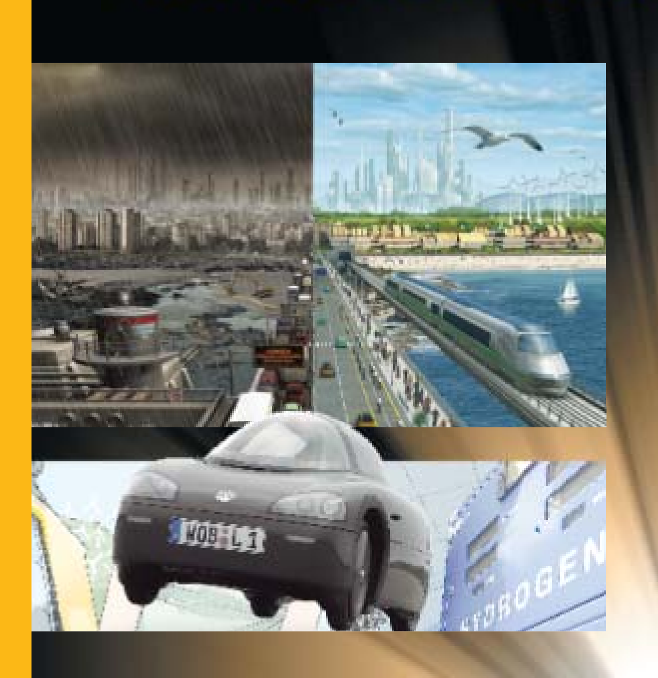
—LUIS ALONSO

EN EL PROXIMO NUMERO... ...DE NOVIEMBRE 2006



ENERGIAS DEL FUTURO

NUMERO MONOGRAFICO Y EXTRAORDINARIO





CONTENCION DEL DIOXIDO DE CARBONO

QUE HACER CON EL CARBON

LA OPCION NUCLEAR

AUGE DE LAS ENERGIAS RENOVABLES

BUENAS EXPECTATIVAS PARA EL HIDROGENO

... Y MAS